



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**“Πειραματική διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής
αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος από λεπτομερή
λατομικά παραπροϊόντα.”**

ΒΑΡΒΑΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Εξεταστική Επιτροπή

Γαλετάκης Μιχαήλ , Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής

Μαρκόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής

Χανιά,

Φεβρουάριος, 2010

Αφιερωμένη
στην οικογένεια μου.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίηση της παιπάλης, που παράγεται ως παραπροϊόν-απόρριμμα των αδρανών υλικών κατά τη λατομική διεργασία, για την παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος. Η διερεύνηση για την αξιοποίηση του λεπτομερούς αυτού υλικού περιλαμβάνει την παρασκευή εργαστηριακών δοκιμών τσιμέντου-νερού-παιπάλης με χρήση ειδικών πρόσμικτων αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Για τον υπολογισμό των βέλτιστων κοκκομετρικών συνθέσεων για την παρασκευή των ανωτέρων δοκιμών χρησιμοποιήθηκε το τροποποιημένο μοντέλο Andreassen.

Στην επιτυχή ολοκλήρωση της προσπάθειας σημαντικό ρόλο διαδραμάτισε η συνεχής και αποτελεσματική συνεργασία με τον Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ.Μ.Γαλετάκη, χωρίς τη βοήθεια του οποίου δεν θα είχε επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα και τον ευχαριστώ θερμά.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη και κ Θεόδωρο Μαρκόπουλο για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους πάνω στο κείμενο και την καλή τους διάθεση να αφιερώσουν μέρος από τον πολύτιμο χρόνο τους για την αξιολόγηση της παρούσας εργασίας.

Αισθάνομαι επίσης ότι οφείλω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Κ. Λεβεντάκη, Διπλωματούχο Μηχανικό Ορυκτών Πόρων και συνεργάτη της ερευνητικής μονάδας Έλεγχος Ποιότητας-Υγείας και Ασφάλειας στη Μεταλλευτική, για την βοήθεια στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου, καθώς επίσης για τις συμβουλές του στη διάρκεια του πειραματικού μέρους και για τις παρατηρήσεις του πάνω στο κείμενο της διπλωματικής εργασίας, Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ.Σ.Μαυριγιαννάκη για τη πολύτιμη βοήθεια του στα πειράματα αντοχής των δοκιμών.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Μιχάλη Μιχάλα για τη βοήθεια του και επίσης την οικογένεια και φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ασβεστολιθική παιπάλη που παράγεται ως παραπροϊόν των αδρανών υλικών, δημιουργεί προβλήματα στην απόθεση της και είναι δύσκολο να απορροφηθεί από άλλους βιομηχανικούς τομείς. Προκειμένου να αξιοποιηθεί το λεπτομερές αυτό υλικό, χωρίς να υποστεί πολύπλοκες και δαπανηρές επεξεργασίες, διερευνήθηκε η δυνατότητα παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος, ενός υλικού που η διερεύνηση του είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο, με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, ώστε να αποτελεί μια συμφέρουσα πρόταση για την αξιοποίηση της παιπάλης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη διερεύνηση της επίδρασης της κοκκομετρικής διαβάθμισης των πρώτων υλών, που λαμβάνουν μέρος στην παρασκευή του αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος, στις ιδιότητες του τελικού (σκληρυμένου) προϊόντος. Για τον λόγο αυτό παρασκευάστηκαν δοκίμια χρησιμοποιώντας: δύο διαφορετικών κοκκομετριών παιπάλη (την «έγχρωμη» και την «λευκή»), τσιμέντο, και νερό. Ακόμη διερευνήθηκε η χρήση ειδικών πρόσμικτων σκυροδέματος για τη βελτίωση των μηχανικών αντοχών με την επιτυγχάνόμενη μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο, και την διατήρηση της συνεκτικότητας και πλαστικότητας των μιγμάτων, σε χαμηλές τιμές του φαινόμενου ιξώδους. Αυτό το τελευταίο προσδιορίστηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργαστηριακής διερεύνησης με την «δοκιμή μικροκώνου εξάπλωσης», η οποία έχει προταθεί βιβλιογραφικά για την περίπτωση του μικροσκυροδέματος.

Για την μελέτη της κοκκομετρικής σύνθεσης των λεπτομερών αδρανών και του τσιμέντου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LISA-TM, το οποίο χρησιμοποιεί το μοντέλο Andreassen για να πετύχει τη κοκκομετρική διαβάθμιση που εξασφαλίζει την επιθυμητή κατά περίπτωση ρευστότητα και μηχανική αντοχή. Η διερεύνηση είχε σαν βασική προϋπόθεση την κατά το δυνατόν μείωση του περιεχόμενου τσιμέντου και των χημικών πρόσμικτων, καθώς αυτά αποτελούν τους κύριους παράγοντες αύξησης του κόστους των προτεινόμενων μιγμάτων.

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν, δηλαδή η πυκνότητα, υδατοαπορροφητικότητα, αντοχή σε θλίψη και κάμψη των δοκιμίων

μετρήθηκαν εργαστηριακά. Διερευνήθηκε στη συνέχεια το κατά πόσο οι φυσικομηχανικές ιδιότητες που παρουσίασαν οι δύο τύποι αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος πληρούν τις προϋποθέσεις για χρήση τους από τον κατασκευαστικό κλάδο ως πληρωτικά υλικά και υλικά υποστρωμάτων δαπέδων.

Στο τέλος παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα, ως απόρροια της εν λόγω διπλωματικής εργασίας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα, που θα καταστήσουν την νέα αυτή τεχνολογία εφαρμόσιμη και συνάμα συμφέρουσα για την βιομηχανία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Πρόβλημα των παραπροϊόντων των λατομείων (παιπάλη).....	1
1.2 Λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων	2
Κεφάλαιο 2. ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΜΙΚΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	5
2.1 Εισαγωγή – Ορισμός Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυροδέματος.....	5
2.2 Χαρακτηριστικά SCC	6
2.2.1 Συστατικά SCC.....	7
2.2.2 Κατηγορίες SCC	10
2.2.3 Ιδιότητες νωπού SCC	12
2.3 Εφαρμογές Αυτοσυμπυκνούμενου Σκυροδέματος	15
2.3.1 Πλεονεκτήματα χρήσης SCC.....	16
2.4 Οδηγίες και Διαδικασία παραγωγής SCC	18
2.4.1 Γενικά.....	18
2.4.2 Αποθήκευση των Συστατικών, Ανάμιξη και Παραγωγή	18
2.5 Μικροσκυρόδεμα	19
2.6 Αυτοσυμπυκνούμενο μικροσκυρόδεμα SCμC	20
Κεφάλαιο 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	23
3.1 Μεθοδολογία πειραματικής διερεύνησης	23
3.2 Χαρακτηρισμός πρώτων υλών	25
3.2.1 Αναλύσεις παιπάλης για κοκκομετρία με laser.....	28
3.2.2 Προσδιορισμό της μορφολογίας κόκκων της παιπάλης με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία	29
3.2.3 Χημικές αναλύσεις παιπάλης	30
3.2.4 Ορυκτολογικές αναλύσεις	31
3.3. Σύνθεση μιγμάτων	33
3.3.1 Επιλογή και Χαρακτηριστικά του κοκκομετρικού μοντέλου Andreassen	36
3.4 Υπολογισμός συνθέσεων-Πειραματικός σχεδιασμός.....	44
3.4.1 Μεθοδολογία υπολογισμού της σύνθεσης.....	44
3.4.2 Πειραματικός σχεδιασμός.....	45
3.4.3 Η δοκιμή «Μικροκώνουon εξάπλωσης».....	47
3.4.4 Στοιχεία συνθέσεων.....	48
Κεφάλαιο 4. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ-ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	56

4.1 Διαδικασία παρασκευής δοκιμίων	56
4.2 Εργαστηριακές μετρήσεις	57
Κεφάλαιο 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	63
Κεφάλαιο 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	78
6.1 Συμπεράσματα	78
6.2 Προτάσεις	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81
Παράρτημα Α	84
Κοκκομετρίες Υλικών.....	84
Παράρτημα Β	86
Διαγράμματα Τάσης-Ανηγμένης Παραμόρφωσης.....	86

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόβλημα των παραπροϊόντων των λατομείων (παιπάλη)

Στην βιομηχανία παραγωγής αδρανών υλικών και κατά τις διαδικασίες εξόρυξης, μεταφοράς και θραύσης, παράγονται μεγάλες ποσότητες λεπτομερών ασβεστολιθικών υλικών, που αποκαλούνται γενικά με τον όρο «λατομική παιπάλη» ή απλά «παιπάλη». Με βάση τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ως παιπάλη ορίζεται το μέρος του αδρανούς που περνάει από το Αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο No 200 (75μm).

Η συσσώρευση των λεπτομερών παραπροϊόντων που προέρχονται από την παραγωγή αδρανών υλικών αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών. Τα προϊόντα αυτά, που σε μεγάλο ποσοστό παραμένουν ανεκμετάλλευτα, θα μπορούσαν να είναι σημαντική πηγή πρώτης ύλης για τον κατασκευαστικό τομέα. Η αξιοποίηση του λεπτομερούς υλικού είτε ως έχει υπό τη μορφή πληρωτικού είτε μετά από επεξεργασία του για την παρασκευή νέων προϊόντων, μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των αποθεμάτων ασβεστόλιθου και κατά συνέπεια των λατομείων. Επιπλέον, απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων λεπτομερών θα έχει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη λόγω μειωμένων εξόδων για απόθεση ή απόρριψη και πρόσθετων εσόδων από την πώληση των νέων προϊόντων. Το μέγεθος του προβλήματος που δημιουργούν τα λεπτομερή είναι χαρακτηριστικό στην Ελλάδα, όπου η παραγωγή αδρανών για το έτος 2008 υπολογίζεται στα 100 εκατομμύρια τόνους, εκ των οποίων 10-15 εκατομμύρια τόνοι είναι τα λεπτομερή παραπροϊόντα (ποσοστό 10-15%) (Τζεφέρης, 2009). Λαμβάνοντας υπόψη και τους κανονισμούς που περιορίζουν ολοένα και περισσότερο το ποσοστό παιπάλης στα διάφορα προϊόντα όπου συμμετέχουν τα αδρανή, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για εξεύρεση λύσεων.

Μέχρι σήμερα τα λεπτομερή ασβεστολιθικά προϊόντα έχουν περιορισμένη χρήση ως γεωργικά πρόσθετα ή πληρωτικά υλικά σε άλλους τομείς της βιομηχανίας. Η διεύρυνση των πεδίων χρήσης προϋποθέτει εκτενή μελέτη ώστε

οι προτάσεις που θα προκύψουν να είναι τεχνικά και οικονομικά εφαρμόσιμες. Σε πολλές περιπτώσεις το κόστος μεταφοράς καθιστά απαγορευτική τη διάθεση της παιπάλης σε άλλες βιομηχανίες, ενώ σε κάποιες άλλες η επεξεργασία του υλικού ώστε να καταστεί σε μορφή κατάλληλη για να συμμετέχει σε ένα προϊόν είναι αρκετά δύσκολη ή αρκετά δαπανηρή. Πριν αναζητηθεί λοιπόν οποιαδήποτε λύση θα πρέπει να γίνει η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της παιπάλης ώστε οι ιδιότητες του υλικού να αποτελέσουν έναν αρχικό οδηγό για τους πιθανούς τομείς απορρόφησής του. Στη συνέχεια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση του λατομείου και η ύπαρξη βιομηχανιών που να ενδιαφέρονται για το νέο προϊόν, η οικονομική απόκτηση και συντήρηση του εξοπλισμού που θα απαιτηθεί για να παραχθεί το νέο προϊόν και η ικανότητα του ανθρώπινου δυναμικού να το υλοποιήσει. Τέλος, πρέπει να ελεγχθούν διάφορες παράμετροι του προϊόντος που θα παραχθεί για να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες ή παραλείψεις στη φάση που το προϊόν βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

1.2 Λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων

Η χρήση των λεπτομερών στον τομέα των κατασκευών για την αντικατάσταση άλλων υλικών, είναι μία από τις λύσεις που έχουν προταθεί διεθνώς για την αξιοποίηση των λεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων. Τα λεπτομερή προϊόντα χρησιμοποιούνται κυρίως στον κατασκευαστικό τομέα της βιομηχανίας, με αποτέλεσμα η ζήτηση να εξαρτάται άμεσα από την οικοδομική δραστηριότητα, τα έργα υποδομών (οδοποιία, λιμάνια, αεροδρόμια κ.α.) και άλλων συναφών δραστηριοτήτων. Ωστόσο, η χρήση εναλλακτικών αδρανών υλικών (μη πρωτογενών αδρανών υλικών) στις κατασκευές δεν έχει ακόμη εξαπλωθεί λόγω διαφόρων παραγόντων, όπως (i) η αβεβαιότητα σχετικά με τις φυσικές τους ιδιότητες και τον τρόπο με τον οποίο θα επιδράσουν στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, και (ii) ο κίνδυνος ρύπανσης του περιβάλλοντος (Hill et al., 2001). Ο Hill et al. έδειξε ότι τα εναλλακτικά υλικά, όπως τα απόβλητα των

λατομείων, μπορούν να αποδώσουν το ίδιο καλά ή ακόμη και καλύτερα από τα συνήθη αδρανή που χρησιμοποιούνται για υποβάσεις δρόμων και επιχώσεις. Όπως υποστηρίχτηκε από τον Rockliff (1996), είναι σημαντικό η χρήση των αδρανών στις κατασκευές να κατευθύνεται από προδιαγραφές για την τελική απόδοση που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα εύρος υλικών διαφορετικής προέλευσης.

Ακόμη η αποκατάσταση χώρων λατομείων αποτελεί ίσως την πλέον οικονομικά βιώσιμη λύση για την χρήση των υπερλεπτομερών λατομικών παραπροϊόντων (Harrison, 2003).

Μια ακόμη ευρεία χρήση των λατομικών λεπτομερών παραπροϊόντων, που έχει προταθεί και βρίσκεται σε εφαρμογή είναι ως υλικά επιχώσεων, που χρησιμοποιούνται κυρίως για έργα οδοποιίας (υποβάσεις δρόμων) των δρόμων μεταφοράς εντός των λατομείων. Οι Fraser και McBride (2000) παρουσίασαν μια μελέτη σχετικά με τις ιδιαίτερες γεωτεχνικές ιδιότητες των λεπτομερών όταν χρησιμοποιούνται ως υλικό για επιχώσεις σε λατομεία δολομίτη. Άρθρο του Touahamia et al. (2002) δείχνει ότι τα λατομικά λεπτομερή μπορεί να υποκαταστήσουν τα αδρανή υπόβασης για δρόμους και σιδηροδρομικές γραμμές, κλπ.

Επίσης οι εφαρμογές λεπτομερών συστατικών προϊόντων ως συστατικό σε ασφαλτοσκυροδέματα και σε άλλα υλικά οδοποιίας, αποτελεί μια ακόμη από τις λύσεις που έχουν προταθεί. Ο Hill et al. (2001) υποστηρίζει ότι τα λεπτόκοκκα αδρανή είναι λιγότερο κατάλληλα σε σχέση με τα χονδρόκοκκα υλικά, όταν αφορά στην κατασκευή δρόμων, διότι δεν έχουν την απαιτούμενη αντοχή. Ωστόσο, είναι κατάλληλα για χρήση στην κατασκευή συνδετικών υλικών με βάση την ασφαλτο και άλλα υλικά οδοποιίας.

Τέλος έχει προταθεί η χρήση λεπτομερών ως αδρανή στο σκυρόδεμα. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, η περιεκτικότητα σε λεπτομερή μπορεί να φτάνει το 40-50% και σε ορισμένες περιοχές να καταναλώνεται όλη η ποσότητα των λεπτομερών που παράγεται από τα τοπικά λατομεία. Τα έτοιμα μίγματα σκυροδέματος περιέχουν 30% λεπτομερή αδρανή, αποτελούμενα από ίσες

ποσότητες λατομικών αδρανών (κυρίως ασβεστόλιθο) και άμμο. Οι ποσότητες λεπτομερών από ψαμμίτη και ιζηματογενή πετρώματα που χρησιμοποιούνται με αυτόν τον τρόπο είναι περιορισμένες, λόγω της υψηλής απαίτησης σε νερό η οποία δημιουργεί στη συνέχεια προβλήματα συρρίκνωσης, κλπ. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να λυθούν μέσω της χρήσης χημικών πρόσθετων, το κόστος των οποίων μπορεί υπό τις κατάλληλες συνθήκες να εξισορροπείται από το μειωμένο κόστος μεταφοράς (Λεβεντάκης, 2009).

Κεφάλαιο 2. ΑΥΤΟΣΥΜΠΥΚΝΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΜΙΚΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 Εισαγωγή – Ορισμός Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυροδέματος

Ως αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (Self Compacted Concrete ή SCC γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία) καλείται το σκυρόδεμα που αποτελείται από λεπτομερή υλικά και έχει τη δυνατότητα να πληρώσει οποιονδήποτε τύπο (ξυλότυπο, μεταλλότυπο, κτλ.) ρέοντας ανάμεσα στον οπλισμό, και να αποκτήσει ικανή συμπίκνωση αποκλειστικά λόγω του ιδίου βάρους του και της ρεολογικής του συμπεριφοράς. Βασικά χαρακτηριστικά του SCC είναι η αυξημένη του ρευστότητα σε συνδυασμό με τη διατήρηση της απαιτούμενης συνεκτικότητας η οποία αποτελεί μέτρο της αντίστασης διαχωρισμού του μίγματος. Πρόκειται για σκυρόδεμα με επιλεκτικά αναβαθμισμένες ιδιότητες και μάλιστα σύμφωνα με τη άποψη αρκετών ερευνητών αποτελεί τη μεγαλύτερη εξέλιξη στον τομέα της τεχνολογίας σκυροδέματος τα τελευταία 50 χρόνια (Καλεντζώτης, 2007)

Το αυτοσυμπυκνούμενο μικροσκυρόδεμα αποτελεί την τελευταία εξέλιξη στο χώρο της τεχνολογίας του σκυροδέματος. Πρόκειται για ένα σκυρόδεμα το οποίο, όπως λέει η λέξη, μπορεί να συμπυκνωθεί μόνο του, χωρίς τη χρήση μηχανικών μέσων, αποκλειστικά και μόνο με το ίδιο βάρος του. Η ευκολία ροής και αυτοσυμπύκνωσης του νέου σκυροδέματος οδηγεί επίσης στη μείωση του απαιτούμενου χρόνου διάστρωσης και σκυροδέτησης έργων. Επίσης η πληρέστερη συμπίκνωση που επιτυγχάνεται στα μείγματα SCC έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και κατ' επέκταση την καλύτερη ποιότητα των έργων οπλισμένου σκυροδέματος.

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα δεν είναι τυποποιημένο. Έτσι, λοιπόν ο κάθε τύπος SCC θα πρέπει να σχεδιάζεται λαμβάνοντας υπ όψιν τις ειδικές συνθήκες του έργου στο οποίο θα εφαρμοστεί. Ο καθορισμός των αναλογιών των συστατικών που θα χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή του, εξαρτάται από τις δομικές απαιτήσεις της κατασκευής, οι διαστάσεις, η πυκνότητα του

οπλισμού και οι συνθήκες κατασκευής. Στις συνθήκες κατασκευής περιλαμβάνονται οι μέθοδοι μεταφοράς, τοποθέτησης, φινιρίσματος, και αγωγής του σκυροδέματος. Η ειδική απαίτηση του SCC είναι η ικανότητα αυτοσυμπύκνωσης χωρίς δόνηση. Όλες οι υπόλοιπες επιδόσεις του, όπως η αντοχή και η ανθεκτικότητα, υπολογίζονται σαν να πρόκειται για ένα συνήθη τύπο σκυροδέματος.

Το SCC δημιουργήθηκε προκειμένου να αντιμετωπίσει συγκεκριμένα προβλήματα που είναι ως εξής (Ανδρεάδη και Ταγκάλου, 2008):

- Προβλήματα ανεπάρκειας ή εκπαίδευσης του εργατικού προσωπικού που οδηγούσε σε ατέλειες συμπίκνωσης και δόνησης.
- Προβλήματα ανεπάρκειας των μελετών, όπου η ελλιπής σχεδίαση των κατασκευών καθιστούσε δύσκολη έως αδύνατη τη σωστή συμπίκνωση του σκυροδέματος.
- Προβλήματα ανθεκτικότητας στο χρόνο, καθώς οι απαιτήσεις για ανθεκτικότητα άνω των 100 ετών γινόταν όλο και περισσότερες.

2.2 Χαρακτηριστικά SCC

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία ένα σκυρόδεμα προκειμένου να χαρακτηριστεί SCC οφείλει να έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (Ανδρεάδη και Ταγκάλου, 2008) :

1. Αποτελείται από λεπτομερή υλικά (συνήθως κάτω των 20mm).
2. Υψηλή ρευστότητα.
3. Πλαστικότητα.
4. Αντίσταση σε διαχωρισμό.
5. Επαρκής ικανότητα πλήρωσης.
6. Υψηλή εργασιμότητα.
7. Υψηλή σταθερότητα.

8. Αυξημένη αντίσταση στη διείσδυση διοξειδίου του άνθρακα, χλωριώντων και νερού και ελαχιστοποίηση της συστολής ξήρανσης στο στάδιο της σκλήρυνσης..

2.2.1 Συστατικά SCC

Τα συστατικά του SCC καθορίζονται ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες του εκάστοτε μίγματος όμως πρέπει να συμφωνούν με τις προδιαγραφές του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 206-1:2000 το οποίο καλύπτει και την περίπτωση συστατικών του κοινού σκυροδέματος. Έτσι έχει ως εξής (Κτενάς, 2006) :

1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ: Γενικώς όλα τα τσιμέντα που συμμορφώνονται με το Πρότυπο EN 197-1:2000 έχουν αποδειχθεί κατάλληλα για την παραγωγή SCC.
2. ΑΔΡΑΝΗ: Τα αδρανή θα συμμορφώνονται με το πρότυπο EN 12620:2002. Το μέγεθος των αδρανών εξαρτάται από την εφαρμογή και συνήθως είναι μικρότερο από 20mm. Το κατ'όγκον ποσοστό των χονδρόκοκκων αδρανών οφείλει να περιορίζεται προς αποφυγήν «γεφυρών» αδρανών που εμποδίζουν τη διέλευση από πυκνές διατάξεις οπλισμών. Η περιεκτικότητα των αδρανών σε υγρασία θα παρακολουθείται συστηματικά και θα πρέπει να συνυπολογίζεται ώστε η ποιότητα του παραγόμενου SCC να διατηρείται σταθερή. Τέλος όλοι οι τύποι άμμου (μέγεθος κόκκου 0.125mm – 4mm) που χρησιμοποιούνται για κοινό σκυρόδεμα είναι κατάλληλες και για την παρασκευή SCC.
3. ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΙΞΗΣ: Το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κοινού σκυροδέματος θα συμμορφώνεται με το πρότυπο EN 1008:2002 που έχει αποδειχθεί κατάλληλο για την παραγωγή SCC.
4. ΠΡΟΣΘΕΤΑ: Χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση ικανοποιητικών ρεολογικών χαρακτηριστικών και παράλληλα τη

μείωση του κινδύνου διαχωρισμού ή εξίδρωσης. Τα κυριότερα πρόσθετα είναι τα εξής :

- Ιπτάμενη Τέφρα (IT , γνωστή και ως pulverized fuel ash, PFA –EN 450-1:2005): Παραπροϊόν της καύσης λεπτοαλεσμένου άνθρακα στα ηλεκτροπαραγωγικά εργοστάσια (π.χ. λιγνίτη για την Ελλάδα). Είναι υλικό με ποζολανικές ιδιότητες πολύ λεπτής διαβάθμισης (ποσοστό διερχόμενων από το κόσκινο 45 μ m > 75%).
- Πυριτική Παιπάλη (silica fume, SF ή microsilica –EN 13263-1:2005) εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό με μέγεθος σωματιδίων 100 φορές μικρότερα από αυτά του κοινού τσιμέντου Portland (περίπου <1 μ m) ώστε να προσκολλάται επιφανειακά στα αδρανή και να γεμίζει τα κενά μεταξύ των σωματιδίων τσιμέντου, προσδίδοντας συνεκτικότητα στο μίγμα. Έτσι αναβαθμίζονται οι ιδιότητες του σκυροδέματος που συνδέονται με τη μικρορηγμάτωση στη διεπιφάνεια αδρανών – μήτρας και τη διαπερατότητα.
- Εξαιρετικά λεπτοαλεσμένη άμορφη κολλοειδής πυριτία (ή nanosilica): Η χρήση της (σε ποσοστό 5% κ.β. επί των τσιμεντοειδών υλικών) περιορίζει την εξίδρωση και συμβάλλει στην σταθεροποίηση του μίγματος
- Σκωρία υψικαμίνων (ground granulated blast furnace slag –B8 6699: 1992) Λεπτότατοι κόκκοι προερχόμενοι από κονιορτοποίηση παραπροϊόντων υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων.
- Πληρωτικά Γυαλιού: Ανακυκλωμένο γυαλί με μέγιστο μέγεθος κόκκου 0.1mm
- Χρωστικές Ουσίες (χρησιμοποιούνται με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN- 12878:2005)

Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα στο SCC είναι η χαλαζιακή σκόνη, η παιπάλη κιμωλίας και ο μετακαολίνης. Με χρήση των παραπάνω είναι δυνατόν να μειωθεί η ποσότητα

τσιμέντου στο μίγμα. Επισημαίνεται τέλος ότι πρόσθετα όπως ο μετακαολίνης και η πυριτική παιπάλη χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές λόγω του αυξημένου τους κόστους, ενώ αντίθετα η τεράστια διαθεσιμότητα ιπτάμενης τέφρας σε συνδυασμό με το χαμηλό της κόστος την καθιστά την «ιδανική σκόνη» για χρήση στο Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα σε μεγάλες ποσότητες, που μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ των 200 και 350 kg/m³.

5. ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ : Τα χημικά πρόσμικτα είναι μακρομοριακές ενώσεις και διακρίνονται στους υπερρευστοποιητές και στους πλαστικοποιητές

- Υπερρευστοποιητές: Οι πιο διαδεδομένοι έχουν σαν βάση τους τη σουλφοναφθαλίνη, τα πολυκαρβοξύλια, τη σουλφομελανίνη και την αμινοσουλφαμίνη. Με τους υπερρευστοποιητές επιτυγχάνεται η μείωση λόγου Νερού/Τσιμέντου με αποτέλεσμα την αύξηση των αντοχών,
- Πλαστικοποιητές: Με τη χρήση των πλαστικοποιητών επιτυγχάνεται η επίτευξη συνεκτικότητας, ομοιογένειας και ισοτροπίας.

Βέβαια η δραστηριότητα των χημικών πρόσμικτων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τον τύπο τους, τη χρονική στιγμή της εισαγωγής τους στο μίγμα, τη δοσολογία τους, το λόγο νερού/τσιμέντου (N/T), την κοκκομετρική τους διαβάθμιση, το είδος των υπολοίπων πρόσμικτων υλικών, τη θερμοκρασία του σκυροδέματος κ.α. Υπάρχει συγκεκριμένη ποσότητα πρόσμικτου για βέλτιστα αποτελέσματα εργασιμότητας του μίγματος για το επιθυμητό χρονικό διάστημα, που να αποτρέπει την απόμιξη και με ελάχιστη επίδραση στο χρόνο πήξης και τις μηχανικές ιδιότητες στις μικρές ηλικίες. Σημείο ιδιαίτερης προσοχής είναι η προσεκτική επιλογή των χημικών πρόσμικτων ώστε να είναι συμβατά τόσο με το τσιμέντο του μίγματος (συνήθως Portland) όσο και μεταξύ τους.

6. ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΙΞΩΔΟΥΣ (viscosity modifying agents - VMAs): Αποτελούν καινοτομία για το πεδίο των χημικών σκυροδέματος, επιτρέποντας την παρασκευή SCC με μικρή ποσότητα πληρωτικών. Συνήθως προστίθενται σε ποσοστό 0.1-0.2% κ.β. τσιμεντοειδών υλικών και διακρίνονται σε δυο τύπους
- Βελτιωτικά άντλησης με βάση τη σελουλόζη
 - Διαλύματα πολυαιθυλενίου-γλυκόλης.
7. ΑΕΡΑΚΤΙΚΑ: Αυτά, όπως και στο κοινό σκυρόδεμα, προσφέρουν προστασία έναντι ψύξης - απόψυξης. Η προσθήκη του αερακτικού στο ανάμιγμα SCC πρέπει να γίνεται μετά την προσθήκη του υπερπλαστικοποιητή.
8. ΙΝΕΣ: Όπως και στο κοινό σκυρόδεμα με την προσθήκη ινών βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του μίγματος. Ίνες από χάλυβα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ρηγμάτωσης (περιορισμός συστολής ξήρανσης) και αυξάνουν τη δυσθραυστότητα, ενώ ίνες πολυπροπυλενίου βελτιώνουν την αντίσταση έναντι διαχωρισμού. Περιεκτικότητες μέχρι και 30kg/m^3 ινών χάλυβα δεν υποβαθμίζουν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του SCC. Για μεγαλύτερες τιμές απαιτούνται προκαταρκτικές δοκιμές της εργασιμότητας του μίγματος, με μέγιστη τιμή 50kg/m^3 . Αντίστοιχα για ίνες πολυπροπυλενίου η μέγιστη περιεκτικότητα ανέρχεται στο 1kg/m^3 .

2.2.2 Κατηγορίες SCC

Το SCC κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη μέθοδο σύνθεσής του, προς αύξηση του φαινόμενου ιξώδους, αλλά και ανάλογα με τον βαθμό αυτοσυμπύκνωσης. Έτσι έχει ως εξής (Καλεντζώτης, 2007) :

1. Με βάση τη μέθοδο σύνθεσής του :
 - Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα τύπου κονίας (powder type SCC) :
Οι αναλογίες του μίγματος είναι τέτοιες ώστε να ικανοποιείται η

απαίτηση της αυτοσυμπύκνωσης, μειώνοντας το λόγο νερού προς λεπτόκοκκα (διάμετρος $<0.1\text{mm}$) και να υπάρχει επαρκής αντίσταση σε διαχωρισμό. Αυτό όμως μειώνει την πλαστικότητα η οποία αποκαθίσταται με προσθήκη υπερρευστοποιητών και αερακτικών. Τέτοιου τύπου ήταν τα πρώτα μίγματα SCC.

- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με βάση τον ρυθμιστικό παράγοντα ιξώδους (Viscosity agent type SCC) : Σε μίγματα χαμηλής ποσότητας συνδετικών κονιών, η αντίσταση σε διαχωρισμό εξασφαλίζεται με προσθήκη ρυθμιστή ιξώδους, ακόμα και λίγο πριν τη διάστρωση.
- Συνδυασμένος τύπος του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος: Η ρευστότητα του SCC επιτυγχάνεται με βάση τα λεπτόκοκκα όπως στον πρώτο τύπο. Παρουσιάζονται όμως σημαντικές ποιοτικές διακυμάνσεις σε αυτήν ανάλογα με τις αυξομειώσεις στην επιφανειακή υγρασία των αδρανών και την κοκκομετρική διαβάθμιση του λεπτόκοκκου κλάσματος. Αυτές οι διακυμάνσεις ελαχιστοποιούνται με χρήση ρυθμιστή ιξώδους.

2. Με βάση το βαθμό αυτοσυμπύκνωσης

- Κατηγορία 1: Για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, όπου οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών είναι μικρότερες από 60mm ή η ποσότητα του οπλισμού υπερβαίνει τα 350kg/m^3 .
- Κατηγορία 2: Για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, όπου οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών είναι μεταξύ 60mm και 200mm ή η ποσότητα του οπλισμού είναι από 100 έως 350kg/m^3 .
- Κατηγορία 3: Για δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα, όπου οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών είναι μεγαλύτερες από 200mm ή η ποσότητα του οπλισμού είναι μικρότερη από 100kg/m^3 .

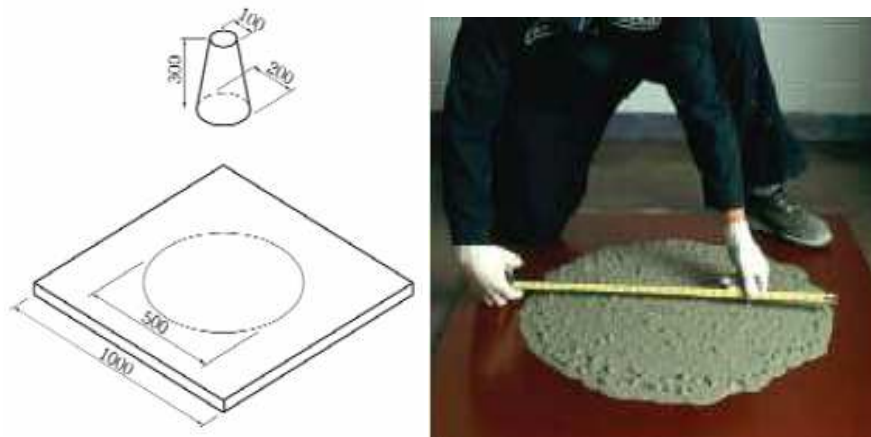
2.2.3 Ιδιότητες νωπού SCC

Το βασικό χαρακτηριστικό του SCC είναι οι ιδιότητες που έχει όσο είναι ακόμα νωπό, καθώς στη στερεή του φάση παρουσιάζει περίπου όμοιες ιδιότητες με το κοινό σκυρόδεμα. Οι ιδιότητες αυτές είναι (Καλεντζώτης, 2007):

- Ροή αποκλειστικά λόγω του ιδίου βάρους του, χωρίς δόνηση
- Ροή μέσω στενών ανοιγμάτων και έτσι πλήρωση ξυλοτύπων με πυκνό οπλισμό
- Διατήρηση ομοιογένειας κατά τη μεταφορά και τη διάστρωση

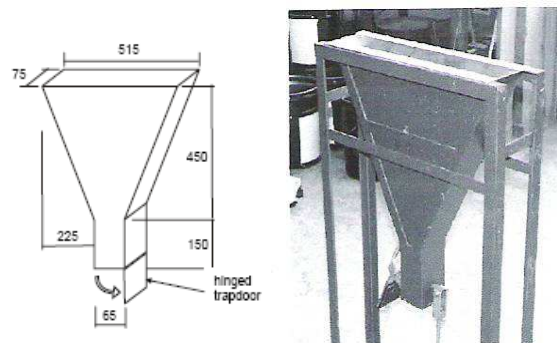
Πέρα από αυτές της βασικές ιδιότητες του SCC, για συγκεκριμένες εφαρμογές, παρασκευάζονται μίγματα με αντίσταση σε απόπλυση και απαλλαγμένες από ατέλειες ελεύθερες επιφάνειες. Για την εκτίμηση των παραπάνω ιδιοτήτων δεν υπάρχει ακόμα κάποια τυποποιημένη δοκιμή, που να τις ελέγχει ταυτόχρονα. Οι κυριότερες δοκιμές είναι:

- Δοκιμή εξάπλωσης : Εδώ αξιολογείται η ικανότητα ανεμπόδιστης οριζόντιας ροής του SCC, για μίγματα όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν μέγιστη διάμετρο κόκκου μικρότερη από 40mm. Χρησιμοποιείται ο ίδιος εξοπλισμός της δοκιμής κάθισης του κοινού σκυροδέματος, δηλαδή ένας μεταλλικός κόλινος κώνος. Αφού γεμίσει με σκυρόδεμα, ο κώνος αφαιρείται και η μάζα σκυροδέματος 'κάθεται' λόγω ιδίου βάρους. Η διαφορά είναι ότι το σκυρόδεμα του δοκιμίου δεν δονείται, και αντί να μετριέται η κάθιση της κορυφής της μάζας του σκυροδέματος σε σχέση με την κορυφή του μεταλλικού κώνου, μετριέται η ακτίνα διάμετρος του κύκλου εξάπλωσης του σκυροδέματος (Σχήμα 2.1), η οποία αποτελεί μέτρο της ικανότητας πλήρωσης του νωπού SCC.



Σχήμα 2.1 Δοκιμή εξάπλωσης (slump flow) (Καλεντζώτης, 2007).

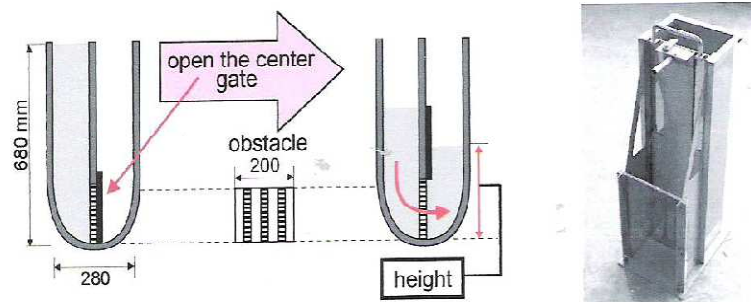
- Η δοκιμή V-Funnel: Αυτή είναι μια μέθοδος εκτίμησης την αντίσταση διαχωρισμού, χρησιμοποιώντας μια χοάνη σχήματος V (Σχήμα 2.2), όγκου 12 λίτρων, και μετρώντας το χρόνο απορροής του μίγματος, για μέγιστη διάμετρο κόκκου χονδρόκοκκων αδρανών μικρότερη από 25mm.



Σχήμα 2.2 Χοάνη σχήματος V (Καλεντζώτης, 2007).

- Η δοκιμή T-50: Άλλη μια μέθοδος εκτίμησης, η οποία υπολογίζει την αντίσταση διαχωρισμού του SCC. Εδώ υπολογίζεται ο απαιτούμενος χρόνος για κύκλο εξάπλωσης διαμέτρου 500mm, στη δοκιμή εξάπλωσης που προαναφέρθηκε. Χαρακτηριστικές τιμές αυτής της δοκιμής για τυπικά μίγματα SCC δίνουν χρόνο T-50 περίπου 2-5 δευτερόλεπτα.

- Η δοκιμή U-box και δοκιμή Fill-Box: Αυτές είναι μέθοδοι εκτίμησης της ικανότητας ροής του SCC μέσω εμποδίων, για μίγματα όπου τα χονδρόκοκκα αδρανή έχουν μέγιστη διάμετρο κόκκου μικρότερη από 25mm. Καθώς το μίγμα μετακινείται από τον ένα θάλαμο στον άλλο μετريέται ο απαιτούμενος χρόνος και τα σχετικά ύψη του σκυροδέματος στους δυο θαλάμους των κιβωτίων (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 Δοκιμή U-Box και Fill-Box (Καλεντζώτης, 2007).

Στον πίνακα 2.1 όπου παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση βασικών ιδιοτήτων του SCC, καθώς και οι οριακές τιμές αποδοχής (Παπανικολάου, 2008).

Πίνακας 2.1 Κριτήρια αποδοχής ιδιοτήτων νωπού SCC.

Ιδιότητα	Δοκιμή	Μονάδες Μέτρησης	Εύρος μονάδων	
			ελάχιστο	μέγιστο
Ικανότητα πλήρωσης (filling ability)	Μέτρο Εξάπλωσης	mm	550	850
	Χρόνος T_{50} στο μέτρο εξάπλωσης	sec	<2	5
	Συσκευή V-funnel	sec	<8	25
	Orimet	sec	0	5
Ικανότητα διέλευσης (passing ability)	Συσκευή L-box	(h_2/h_1)	0,8	1,0
	Συσκευή U-box	(h_2-h_1) mm	0	30
	Συσκευή Fill-box	%	90	100
	Συσκευή J-ring	mm	0	10
Αντίσταση στο διαχωρισμό	Συσκευή GTM test	%	0	15
	Χρόνος T_{5min} στη συσκευή V-funnel	sec	0	+3

2.3 Εφαρμογές Αυτοσυμπκνούμενου Σκυροδέματος

Οι εφαρμογές του SCC έχουν ως εξής (Ανδρεάδη και Τάγκαλου, 2008) :

1. Οι πρώτες γνωστές εφαρμογές του είναι οι βάσεις αγκύρωσης της γέφυρας Akashi-Kaiyo (Σχήμα 2.4). Σε αυτήν την περίπτωση η χρήση του SCC μείωσε το χρόνο κατασκευής του κατά 20%. Έκτοτε, έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα στη γεφυροποιία τόσο για κατασκευαστικούς όσο και για επισκευαστικούς λόγους



Σχήμα 2.4 Χρήση SCC στη γεφυροποιία.

2. Λόγω των μεγάλων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει το SCC τόσο στην εφαρμογή όσο και στην κοστολόγηση του έχει πλέον αρχίσει να εφαρμόζεται στην βιομηχανία των προκατασκευών. Οι προκατασκευές αυτές αφορούν είτε μεγάλα τεχνικά έργα, είτε μικρότερα.
3. Λόγω της ευκολίας που παρουσιάζει το SCC στη σκυροδέτηση, ειδικά σε στοιχεία μικρού πάχους όπως οι πλάκες όπου δεν χρειάζεται δόνηση, παρατηρούμε ότι έχει ξεκινήσει να εφαρμόζεται η τεχνική αυτή στην κατασκευή πλακών οικοδομής.
4. Επίσης χρησιμοποιείται σε στοιχεία μεγάλου μεγέθους και πυκνών οπλισμών, προκειμένου να εξασφαλιστεί η σωστή σκυροδέτηση και

συμπύκνωση, αλλά και να καλυφθούν οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας συνίσταται η χρήση του SCC.

2.3.1 Πλεονεκτήματα χρήσης SCC

Τα πλεονεκτήματα του SCC που το καθιστούν πλέον στις πρώτες θέσεις επιλογής σκυροδέματος είναι ως εξής (Καλεντζώτης, 2007) :

1. Δε χρειάζεται δόνηση με αποτέλεσμα λιγότερο θόρυβο στο εργοτάξιο και δυνατότητα σκυροδέτησης ακόμα και σε ώρες κοινής ησυχίας. Καλύτερο περιβάλλον εργασίας και σημαντική μείωση της πιθανότητας εργατικών ατυχημάτων.
2. Δυνατότητα σκυροδέτησης μελών περίπλοκης γεωμετρίας και πυκνού οπλισμού (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Χρήση SCC για σκυροδέτηση και πυκνό οπλισμό.

3. Αύξησης ταχύτητας σκυροδέτησης που οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας.
4. Διευκόλυνση της διαδικασίας της σκυροδέτησης, με λιγότερες απαιτήσεις σε προσωπικό άρα και μείωση του συνολικού κόστους της κατασκευής.

5. Διαβεβαίωση αξιόπιστης συμπίκνωσης του μίγματος άρα μεγαλύτερη ανθεκτικότητα κατασκευής.
6. Μείωση της διασποράς των τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων.
7. Μικρότερη φθορά των ξυλοτύπων αφού δε δονείται το σκυρόδεμα.
8. Μικρότερη φθορά στους αναδευτήρες του νωπού σκυροδέματος λόγω μικρότερων εσωτερικών διατμητικών δυνάμεων.
9. Καλύτερες επιφάνειες μετά το ξεκαλούπωμα, με λιγότερες ατέλειες και άρα οικονομία αφού δεν απαιτούνται περαιτέρω εργασίες επιδιόρθωσής τους.
10. Αυξημένη αντοχή σε πρώιμο στάδιο σε σχέση με το δονούμενο σκυρόδεμα.
11. Μικρότεροι λόγοι νερού / τσιμέντο (< 0.35) που οδηγεί σε αύξηση της αντοχής χωρίς ταυτόχρονη απώλεια εργασιμότητας.

Βέβαια υπάρχουν και κάποια σημεία κατά την παρασκευή μιγμάτων SCC τα οποία χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία σε διακυμάνσεις των ιδιοτήτων των συστατικών. Απαιτείται μεγαλύτερη εξειδίκευση του προσωπικού που είναι υπεύθυνο για τη μελέτη σύνθεσης, την παραγωγή, τη μεταφορά, την άντληση και τη διάστρωση του SCC. Απαιτείται η εξασφάλιση της στεγανότητας των ξυλοτύπων λόγω κινδύνου απώλειας μίγματος και η προσεκτική τους διαστασιολόγηση για υψηλούς ρυθμούς σκυροδέτησης. Για την περίπτωση της προκατασκευής είναι αναγκαία η αναβάθμιση των εγκαταστάσεων και της υπάρχουσας υλικοτεχνικής υποδομής (π.χ. πρόσθετο σιλό αποθήκευσης κονιών, νέες συσκευές ελέγχου των ιδιοτήτων του νωπού SCC, νέα χημικά πρόσμικτα).

2.4 Οδηγίες και Διαδικασία παραγωγής SCC

2.4.1 Γενικά

Η μονάδα παραγωγής SCC πρέπει να διαθέτει (Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2006):

1. Κατάλληλα υλικά
2. Κατάλληλο εξοπλισμό
3. Προδιαγραμμένες λειτουργίες
4. Εκπαιδευμένο και έμπειρο προσωπικό σχετικά με SCC

2.4.2 Αποθήκευση των Συστατικών, Ανάμιξη και Παραγωγή

Συνίσταται τα αδρανή να έχουν τουλάχιστον την υγρασία απορροφήσεως και να αποθηκεύονται καλυμμένα, έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η υγρασία τους. Τα πρόσμικτα κάθε είδους θα πρέπει να αποθηκεύονται σύμφωνα με τις οδηγίες των προμηθευτών τους (Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2006).

Συνίσταται να γίνεται χρήση αναμικτήρων βιαίας ανάμιξης, εντούτοις, είναι εφικτή η παραγωγή SCC και με τον συνήθη τύπο αναμικτήρα. Απαιτούνται δοκιμαστικά αναμίγματα για να καθοριστεί ο χρόνος αναμίξεως. Γενικά απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ανάμιξης από το δονούμενο σκυρόδεμα (Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2006).

Η χρονική στιγμή της προσθήκης των πρόσμικτων είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι διαδικασίες προσθήκης θα πρέπει να ακολουθούν τις οδηγίες του προμηθευτή σε σχέση με τις βιομηχανικές δοκιμές (Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2006).

Κατά τη διάρκεια παραγωγής του SCC, πρέπει να γίνονται πιο συχνοί έλεγχοι στην κοκκομετρία και την υγρασία αδρανών από ότι στο συμβατικό σκυρόδεμα γιατί το SCC είναι πιο ευαίσθητο στις διακυμάνσεις αυτές.

Η ποσότητα νερού πρέπει να ρυθμίζεται συνεχώς ανάλογα με την υγρασία των αδρανών λόγω της ευαισθησίας του SCC. Συνίσταται η αυτόματη ρύθμιση της

δοσολογίας του νερού μέσω κατάλληλου αυτοματισμού σε συνδυασμό με τα υγρασιόμετρα. Στην αρχή της παραγωγής η ποιότητα του νωπού σκυροδέματος μπορεί να έχει διακυμάνσεις, για αυτόν τον λόγο η εργασιμότητα πρέπει να ελέγχεται από τον παραγωγό σε κάθε εκφόρτωση του αναμικτήρα ώσπου να επιτευχθεί SCC σταθερής ποιότητας. Ακολούθως κάθε παραδιδόμενο φορτίο μπορεί να ελέγχεται οπτικά πριν την μεταφορά στο έργο. Όσον αφορά τις πρότυπες δοκιμές, εκτός των ειδικών δοκιμών που απαιτούνται για το SCC, θα γίνονται με τη συχνότητα που το απαιτεί ο EN 206-1:2000. Η πιο συχνή ρύθμιση που απαιτεί το μίγμα του νωπού SCC είναι η περιεκτικότητα του σε νερό, η οποία ρυθμίζεται σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ελέγχου υγρασίας των αδρανών (Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ, 2006).

Τα μέσα παραγωγής που χρησιμοποιούνται στο συμβατικό σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο SCC. Η ανάμιξη των συστατικών όπως τα αναφέραμε πιο πάνω μπορεί να γίνουν είτε σε συγκρότημα παραγωγής είτε σε μπετονιέρες. Στον κάδο ανάμιξης αρχικά γίνεται έκχυση το 90 % του νερού που χρειάζεται, τοποθετούνται τα συστατικά και στη συνέχεια το υπόλοιπο νερό, ο υπερρευστοποιητής και ο πλαστικοποιητής. Πριν τη σκυροδέτηση θα πρέπει να γίνεται ανάδευση του SCμC για 3-5 λεπτά σε πλήρη ταχύτητα και όταν προστεθούν οι υπερρευστοποιητές και πλαστικοποιητές ανάμιξη για τουλάχιστον 1 min/m³ και όχι λιγότερο από 7 min.

Τέλος επειδή το SCC ξηραίνεται γρηγορότερα από το δονούμενο σκυρόδεμα γιατί υπάρχει λίγο έως καθόλου νερό εξίδρωσης στην επιφάνεια πρέπει όταν γίνεται η σκυροδέτηση SCC σε κλιματολογικές συνθήκες που ευνοούν την ταχεία εξάτμιση του νερού να αρχίζει η συντήρηση του SCC το συντομότερο δυνατό.

2.5 Μικροσκυρόδεμα

Το μικροσκυρόδεμα (Micro-concrete) μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης, που σαν κυρίαρχο χαρακτηριστικό του έχει την λεπτή κοκκομετρία των αδρανών υλικών που το απαρτίζουν. Η κοκκομετρία

των αδρανών υλικών, που λαμβάνουν μέρος στη σύνθεση του ξεκινά από 0,5 mm και φτάνει έως 1mm. Η κοκκομετρική λεπτότητα των υλικών του μικροσκυροδέματος βελτιώνει τη κοκκομετρική διάστρωση και συμπύκνωση του συστήματος του σκυροδέματος (Felekoglu, 2005).

Τα χαρακτηριστικά αυτά το κάνουν κατάλληλο για ένα ευρύ φάσμα χρήσεων και γι' αυτό το λόγο τα τελευταία χρόνια τυχαίνει αντικείμενο ερευνητικής διερεύνησης.

2.6 Αυτοσυμπυκνούμενο μικροσκυρόδεμα SCμC

Όπως έχει επισημανθεί ήδη παραπάνω, η αξιοποίηση της παιπάλης θεωρείται σήμερα επιβεβλημένη, αφού αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της βιομηχανίας των αδρανών. Όμως όλες οι λύσεις που εφαρμόζονται είτε έχουν προταθεί έως σήμερα δεν είναι σε θέση να επιλύσουν το πρόβλημα, αφού τα ποσοστά συμμετοχής της παιπάλης στα προτεινόμενα υλικά είναι πολύ χαμηλά, οπότε και οι ποσότητες παιπάλης που δύνανται να απορροφηθούν είναι πολύ μικρές για να αποτελέσουν, συνολική λύση στο πρόβλημα.

Για αυτόν ακριβώς τον λόγο διερευνάται στην εργασία αυτή, η δυνατότητα παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος, που αποτελεί ένα συνδυασμό αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με κοκκομετρία μικροσκυροδέματος. Στην πραγματικότητα η διερεύνηση παραγωγής του αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος είναι μια προσπάθεια για συνδυασμό της τεχνολογίας του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και της τεχνολογίας του μικροσκυροδέματος. Δηλαδή στόχος της νέας αυτής τεχνολογίας είναι να συνδυάσει τις μηχανικές αντοχές του μικροσκυροδέματος και την ρεολογική συμπεριφορά του αυτοσυμπυκνούμενου. Η δυνατότητα άμεσης εφαρμογής της θα προσδώσει στον κλάδο αδρανών-οικοδομικών υλικών της χώρας μας σημαντικό τεχνολογικό-ανταγωνιστικό πλεονέκτημα ενώ ταυτόχρονα θα συμβάλλει στη βελτίωση των δεικτών του που σχετίζονται με την περιβαλλοντική απόδοση και την αειφορία. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα

σημαντικό για το λατομικό κλάδο στον οποίο τα τελευταία χρόνια ασκείται ισχυρή κοινωνική πίεση για βελτίωση των περιβαλλοντικών του αποδόσεων.

Διερευνάται, λοιπόν, η δυνατότητα παρασκευής αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος αποκλειστικά από ασβεστολιθική παιπάλη και τσιμέντο ως πρώτες ύλες. Όμως όπως έχει διαπιστωθεί οι υπάρχουσες γνώσεις για την σύνθεση-παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος από υπερλεπτομερή αδρανή υλικά είναι περιορισμένες. Λόγω της πολύ λεπτής αλλά και παραπλήσιας κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών και της συνδετικής κονιάς (τσιμέντο), τα μίγματα αυτά απαιτούν ειδικές συνθήκες παραγωγής και εξειδικευμένες μελέτες σύνθεσης. Μια τέτοια χρήση της ασβεστολιθικής παιπάλης εκτιμάται ότι μπορεί να αποτελέσει μια πολύ αποτελεσματική λύση για το πρόβλημα σταθεροποίησης, διακίνησης και διάθεσής της που αντιμετωπίζουν οι μονάδες παραγωγής αδρανών υλικών, σκυροδέματος και ασφαλτομιγμάτων.

Η νέα αυτή τεχνολογία για την αξιοποίηση της λατομικής παιπάλης εμφανίζεται ως ιδιαίτερα υποσχόμενη για τους εξής λόγους :

1. Μπορεί να αξιοποιήσει μεγάλες ποσότητες παιπάλης και συνάμα να αποτελέσει εξολοκλήρου από μόνη της, λύση για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία των αδρανών.
2. Είναι άμεσα εφαρμόσιμη χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε εξειδικευμένο εξοπλισμό.
3. Παράγεται με απλή ανάμιξη και μικρή κατανάλωση ενέργειας.
4. Υπάρχει ευρεία αγορά διάθεσης του παραγόμενου προϊόντος.
5. Η αξιοποίηση του λατομικού παραπροϊόντος θα συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη εκμετάλλευση των πετρωμάτων, των λατομικών περιοχών, τα οποία αποτελούν εξαντλήσιμους φυσικούς πόρους και η ορθολογική διαχείριση τους είναι επιβεβλημένη.

Επίσης μέρος της έρευνας είναι το κατά πόσο αυτή η νέα τεχνολογία, δηλαδή το αυτοσυμπυκνούμενο μικροσκυρόδεμα, θα χαρακτηρίζεται και από τις ιδιότητες

και σε ποιο βαθμό του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος και του μικροσκυροδέματος.

Κεφάλαιο 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Μεθοδολογία πειραματικής διερεύνησης

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως έχει αναφερθεί, είναι η διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησης της ασβεστολιθικής παιπάλης, η οποία θεωρείται έως τώρα λατομικό απόρριμμα, για την παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος (SCμC).

Η πειραματική διερεύνηση επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό των συνθέσεων του αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος και στον έλεγχο των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων του σκληρυμένου μίγματος, ώστε να διαπιστωθεί αν πληρούν τις προϋποθέσεις για τις προτεινόμενες χρήσεις.

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν, χρησιμοποιώντας ως πρώτες ύλες διαφόρων τύπων παιπάλη (λευκή, φαιά, μαύρη), καθώς επίσης και κοινό τσιμέντο τύπου Portland CEM II. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν ειδικά χημικά πρόσμικτα σκυροδέματος, όπως υπερρυστοποιητές και πλαστικοποιητές για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων σε μηχανικές αντοχές, συνεκτικότητα, ομοιογένεια και ισοτροπία.

Υπερρυστοποιητές χαρακτηρίζονται χημικά πρόσμικτα σκυροδέματος, τα οποία με πολύ μικρή συμμετοχή τους στο μίγμα, επιτυγχάνουν με μείωση του φαινομένου ιξώδους μιας δεδομένης σύνθεσης σκυροδέματος χωρίς την αύξηση συμμετοχής του νερού στο μείγμα. Αυτός είναι και ο λόγος που χαρακτηρίζονται και ως «μειωτές νερού». Υπενθυμίζεται πως βασικός κανόνας της τεχνολογίας σκυροδέματος είναι πως η μείωση της συμμετοχής του νερού στο μίγμα επιφέρει άμεση αύξηση των αντοχών, αφού το νερό προστίθεται πάντα σε χημική περίσσεια για την ενυδάτωση των φάσεων του τσιμέντου, ώστε να προσδώσει στο μίγμα την απαιτούμενη ρευστότητα.

Πλαστικοποιητές αυτοσυμπύκνωσης (SCC additives) ονομάζονται τα χημικά πρόσμικτα που εισήγαγαν την τεχνολογία της αυτοσυμπύκνωσης την δεκαετία του '80, επιτρέποντας την διατήρηση της ομοιογένειας και της Νευτώνειας, μακροσκοπικά, ρεολογίας, σε πολύ χαμηλές τιμές φαινόμενου ιξώδους. Αποτρέπουν δηλαδή τον «διαχωρισμό» του σκυροδέματος και διατηρούν την ομοιογένεια και μακροσκοπική ισοτροπία του.

Θα πρέπει να διευκρινιστεί πως σημαντικότερο κόστος για την παρασκευή των προτεινόμενων συνθέσεων εμφανίζονται στα επιμέρους κόστη του τσιμέντου και των χημικών πρόσμικτων. Οποιαδήποτε λοιπόν προσπάθεια εφαρμογής σε μεγάλη κλίμακα των υπό διερεύνηση μιγμάτων πρέπει να επιδιώκει την ελαχιστοποίησή τους. Γενικός στόχος ήταν η επίτευξη ικανοποιητικών μηχανικών ιδιοτήτων για οικοδομική χρήση των υπό σχεδιασμό συνθέσεων, με διατήρηση του τελικού κόστους σε χαμηλά επίπεδα.

Σε πρώτη φάση, η πειραματική διερεύνηση κινήθηκε προς την κοκκομετρική βελτιστοποίηση των συνθέσεων αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος με τον υπολογισμό των ποσοστών συμμετοχής των επί μέρους στερεών συστατικών, με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου LISA TM, το οποίο διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο από την εταιρεία ELKEM Silicon Materials. Το λογισμικό LISA-TM, βασίζεται στο μοντέλο Andreassen, το οποίο αποτελεί και το μοναδικό μαθηματικό εργαλείο για την μελέτη σύνθεσης ιδιαιτέρως λεπτόκοκκων αδρανών υλικών, σε αντίθεση με τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία σκυροδέματος σήμερα, τα οποία αναφέρονται σε πολύ πιο χονδρόκοκκα υλικά (Brouwers, 2005). Συγκεκριμένα, από τις προτεινόμενες κοκκομετρικές καμπύλες για την προσαρμογή των μιγμάτων επελέγη η τροποποιημένη καμπύλη Andreassen, γιατί σε αυτήν προσδιορίζονται τα άνω και κάτω όρια της κοκκομετρίας με τις παραμέτρους «μέγιστος και ελάχιστος κόκκος». Οι διαδικασίες διαχωρισμού και συλλογής της λατομικής παιπάλης με αεροκυκλώνα και σακκόφιλτρα, έχουν σαν αποτέλεσμα το συλλεγόμενο κλάσμα να περιορίζεται από ένα μέγιστο κόκκο

(καθορίζεται από τον αεροκυκλώνα) και ένα ελάχιστο κόκκο (καθορίζεται από το σακκόφιλτρο).

Μετά την παρασκευή των πρώτων πειραματικών συνθέσεων και επιδιώκοντας την μέγιστη δυνατή μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού για την επίτευξη της εκάστοτε φαινόμενης ρευστότητας, οι δοσολογίες τόσο του ρευστοποιητή, όσο και του πλαστικοποιητή αυτοσυμπύκνωσης, διατηρήθηκαν κατά την διερεύνηση στις μέγιστες προτεινόμενες από τον κατασκευαστή τιμές. Έτσι οι παράμετροι διερεύνησης που αφορούσαν στις συγκεντρώσεις των πρόσμικτων ήταν σταθερές. Η ποσότητα νερού που καθορίστηκε με βάση την επίτευξη της προκαθορισμένης ρεολογικής συμπεριφοράς (φαινόμενο ιξώδες, βλ. τιμή δοκιμής «μικροκώνου εξάπλωσης»).

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές πως σαν ελεύθερες παράμετροι του υπό διερεύνηση συστήματος παρέμειναν η περιεκτικότητα του τσιμέντου, καθώς και η ρεολογική συμπεριφορά του πολφού των μιγμάτων, όπως ποσοτικοποιείται με την δοκιμή «μικροκώνου εξάπλωσης». Αυτά προσδιορίζουν άμεσα τόσο τις τελικές μηχανικές αντοχές του σκληρυμένου μικροσκυροδέματος, όσο και την ρεολογική συμπεριφορά του νωπού πολφού.

Κατά την παρασκευή των προτεινόμενων συνθέσεων χυτεύθηκαν δοκίμια, τα οποία μετά την ωρίμανση τους σε ειδικό θάλαμο, σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος, ελέγχθηκαν για την αντοχή τους σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη (πρότυπο ASTM C109), σε κάμψη (πρότυπο ASTM C348) και σε υδατοαπορρόφηση, ενώ μετρήθηκε και η πυκνότητά τους.

3.2 Χαρακτηρισμός πρώτων υλών

Οι τρεις μακροσκοπικά διακριτές ποιότητες ασβεστολιθικής παιπάλης που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την εταιρεία ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε., η οποία δραστηριοποιείται στην παραγωγή νωπού σκυροδέματος και ασφαλομίγματος στην Βιομηχανική Περιοχή Ηρακλείου.

Με βάση τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος ως παιπάλη ορίζεται το μέρος του αδρανούς που περνάει από το Αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο Νο 200 (75μm) και προσδιορίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-305. Η παιπάλη της άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% του ξηρού βάρους της και η παιπάλη των πιο χονδρόκοκκων κλασμάτων (ρυζάκι, γαρμπίλι, σκύρα) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1% του ξηρού βάρους του.

Η παιπάλη που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, αποτελείται από τις τρεις μακροσκοπικά διακριτές ποιότητες ασβεστολιθικής παιπάλης που παράγει σαν παραπροϊόν η προαναφερθείσα εταιρεία (Σχήμα 3.1), οι οποίες υπαγόρευσαν και διαφορετικές στρατηγικές δειγματοληψίας. Αυτό δικαιολογείται από τις διαφορετικές μεθόδους συλλογής της παιπάλης κατά τα στάδια παραγωγής, αλλά έχει και σαν τελικό αποτέλεσμα διαφορετικές φυσικοχημικές ιδιότητες για τα τελικά υλικά. Τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος συλλογής και δειγματοληψίας των τριών ειδών παιπάλης που χρησιμοποιήθηκαν ακολουθεί παρακάτω (Λεβεντάκης, 2009):



Σχήμα 3.1 Μακροσκοπικά διακριτές ποιότητες παιπάλης. 1.Λευκή παιπάλη
2.Φαιά παιπάλη 3.Μαύρη παιπάλη

1. Λευκή (ξηρή) παιπάλη

Το υλικό αυτό συλλέγεται με διαδικασίες αέριου διαχωρισμού, όπως σακκόφιλτρα, αεροδιαχωριστές, αναρροφητήρες πάνω από ταινίες υλικού και η διαχείρισή του δημιουργεί το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα μια που η κοκκομετρία του καθιστά εύκολη την διασπορά του στον αέρα. Συλλέγεται

κατά την παραγωγή του σκυροδέματος από την γραμμή των χονδρόκοκκων υλικών, κατά την προσπάθεια ελέγχου της παιπάλης εντός των νόμιμων ποσοστών σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Πολύ μεγαλύτερες ποσότητες του υλικού αυτού συλλέγουν οι παρακείμενες εντός της Βιομηχανικής Περιοχής Ηρακλείου εταιρείες παραγωγής σκυροδέματος. Η ανάγκη όμως περιβαλλοντικά ορθής διαχείρισής της θα επέτρεπε στην εταιρεία ΑΣΦΑΛΤΙΚΗ Α.Τ.Ε να διαχειριστεί το σύνολο της παραγόμενης στην βιομηχανική περιοχή παιπάλη με οικονομικά συμφέροντα τρόπο.

Η δειγματοληψία έγινε με συλλογή κατάλληλων ποσοτήτων από πλήθος σημείων στους σωρούς εναπόθεσης του υλικού αυτού μέσα στους χώρους της εταιρείας, όπως κάτω από ταινίες, προσήνεμες θέσεις κάτω από σημεία απόρριψης/μεταφόρτωσης, προσήνεμα σημεία σε τοίχους, κολώνες κ.τ.λ. Συγκεντρώθηκε συνολικά ποσότητα περί τα 60 kg σε πλαστικούς σάκους.

2. Μαύρη παιπάλη

Το υλικό αυτό προέρχεται από το ψηλότερο των δύο σκαμμάτων πάχυνσης. Συλλέγεται σε υγρή κατάσταση, με τη μορφή πολφού και ρέει με φυσική ροή μέχρι τη θέση εναπόθεσης/πάχυνσης/ξήρανσης. Προέρχεται από τα φίλτρα αποκονίωσης της γραμμής παραγωγής του ασφαλοσκυροδέματος τα οποία εκφορτίζονται με ψεκασμό νερού ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς και από αεροκυκλώνες οι οποίοι όμως λειτουργούν με τα καυσαέρια του καυσίμου (μαζούτ) από τον καυστήρα του ασφαλικού συγκροτήματος. Τα καυσαέρια λόγω των περιεχόμενων άκαυστων σωματιδίων που περιέχουν (αιθάλη) προσδίδουν σε σημαντικό βαθμό την μαύρη απόχρωση στην παιπάλη αυτή.

Η δειγματοληψία έγινε με λήψη 15 δειγμάτων από την επιφάνεια της δεξαμενής. Οι θέσεις δειγματοληψίας κάλυψαν ομοιόμορφα όλη την επιφάνεια της. Η πρόσβαση σε όλα τα σημεία της δεξαμενής ήταν εφικτή επειδή κατά το χρονικό αυτό διάστημα είχε να τροφοδοτηθεί για αρκετές μέρες με πολφό παιπάλης με αποτέλεσμα το υλικό να είναι ξηρό και συμπαγές. Η αρίθμηση των δειγμάτων ξεκινά από το σημείο τροφοδοσίας της δεξαμενής και ακολουθεί

σπειροειδή πορεία σύμφωνα με τους δείκτες του ρολογιού, για τα δείγματα 1 έως 15, προς το κέντρο της.

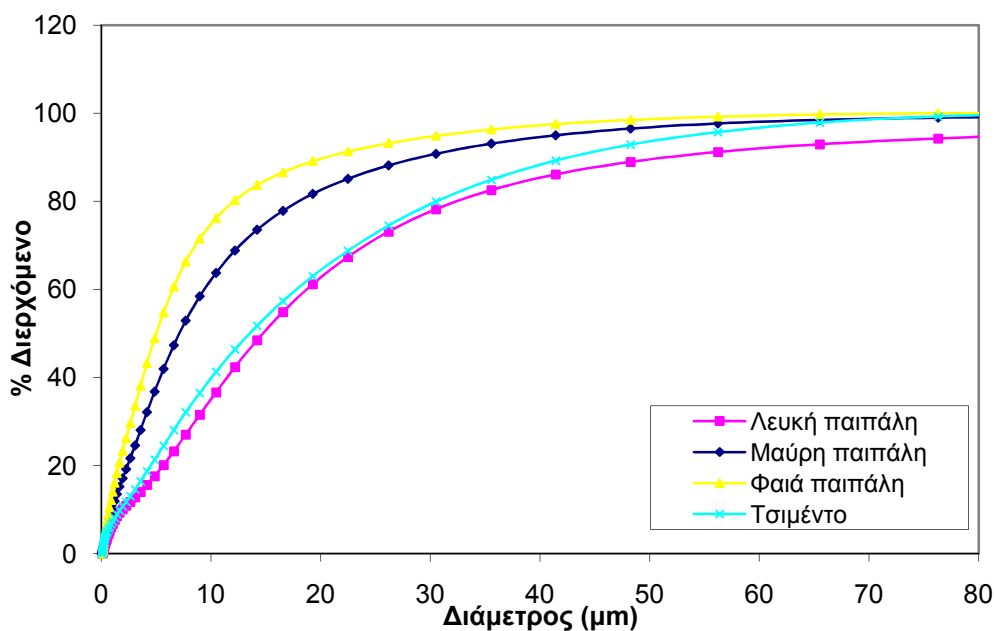
3. Φαιά παιπάλη

Το υλικό αυτό προέρχεται από το χαμηλότερο των δύο σκαμμάτων πάχυνσης, και παράγεται με τις ίδιες ακριβώς διαδικασίες όπως και η μαύρη. Η δεξαμενή αυτή βρισκόταν σε λειτουργία κατά τον χρόνο της επίσκεψης και δεν επέτρεπε την πρόσβαση σε όλη την επιφάνειά της. Στην εικόνα παρακάτω παρουσιάζεται μακροσκοπικά η φαιά παιπάλη (Σχήμα 3.2).

Η δειγματοληψία έγινε με διαδοχική επιφανειακή λήψη 15 δειγμάτων με φτυάρι, από την περιφέρεια της δεξαμενής, με αρχή το σημείο τροφοδοσίας της δεξαμενής και φορά αυτή των δεικτών του ρολογιού, για τα δείγματα με κωδικούς 16 – 30.

3.2.1 Αναλύσεις παιπάλης για κοκκομετρία με laser

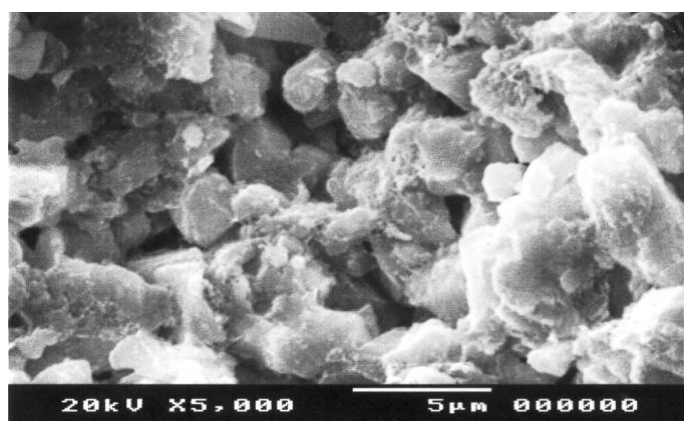
Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων laser, με την βοήθεια του συστήματος «Mastersizer S" του οίκου Malvern Instruments. Η απαγόμενη με αέρα ξηρή λευκή παιπάλη από τα αδρανή σκυροδέματος, με βάση τις εργαστηριακές αναλύσεις είναι λιγότερο λεπτομερής από την μαύρη και την φαιά, όπως φαίνεται από τις κοκκομετρικές καμπύλες. Οι καμπύλες αθροιστικά διερχόμενων μεγεθών φαίνονται στο Σχήμα 3.2. Στο Παράρτημα Α παρατίθεται πίνακας, όπου περιέχει τα αθροιστικώς διερχόμενο ποσοστό των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν στη πειραματική διαδικασία



Σχήμα 3.2 Κοκκομετρικές καμπύλες των διαφόρων τύπων παιπάλης. Για σύγκριση δίνεται και η κοκκομετρική καμπύλη του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε.

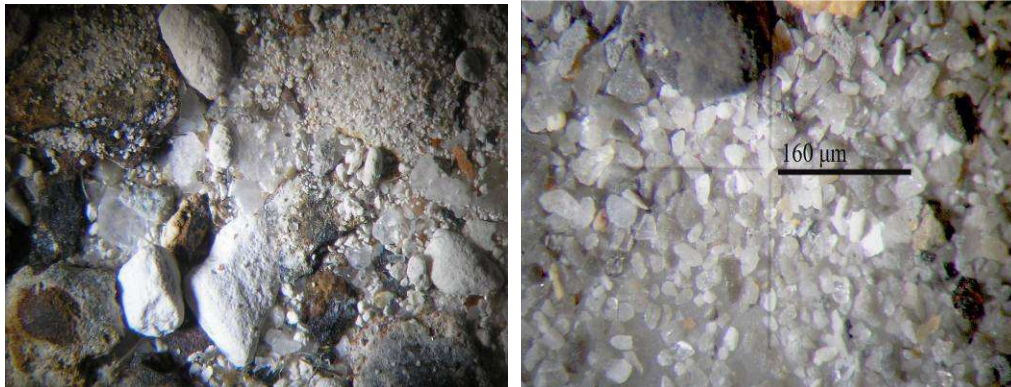
3.2.2 Προσδιορισμό της μορφολογίας κόκκων της παιπάλης με οπτική και ηλεκτρονική μικροσκοπία

Στην εικόνα του Σχήματος 3.3, η οποία προέρχεται από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, φαίνεται η μορφολογία των κόκκων της παιπάλης. Οι κόκκοι εμφανίζονται ως ακανόνιστα γωνιώδη τεμαχίδια ενώ η χημική ανάλυση έδειξε ότι είναι σχεδόν αποκλειστικά ασβεστιτικής σύστασης.

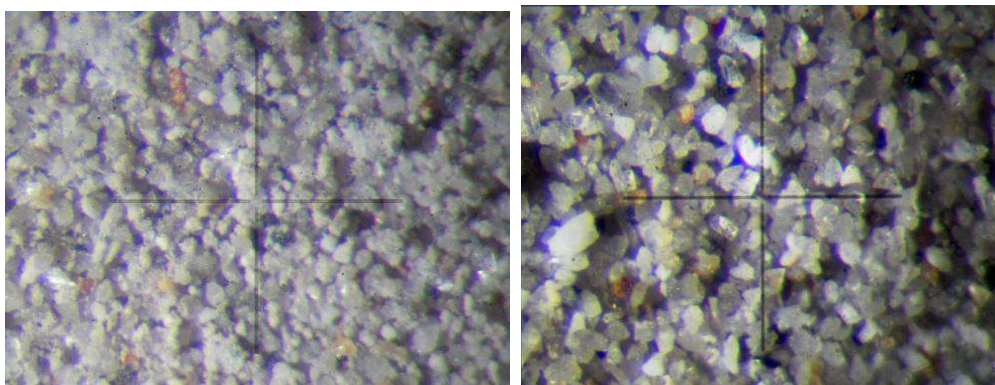


Σχήμα 3.3 Μικροφωτογραφία κόκκων μαύρης παιπάλης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Οι εικόνες που δίνονται στα Σχήματα 3.4 και 3.5 προέρχονται από στερεοσκοπικό μικροσκόπιο και παρουσιάζουν διάφορα κλάσματα άσπρης, φαιάς και μαύρης παιπάλης, όπως αυτά πάρθηκαν μετά από υγρή κοσκίνηση. Παρατηρείται ότι στα μεγάλα κλάσματα της παιπάλης (+75 μm) οι κόκκοι είναι ανομοιογενείς και υπάρχουν και ξένα υλικά που πιθανόν παρασύρθηκαν από τον αέρα. Αντίθετα στα μικρότερα κλάσματα (-75 +56 μm και -56 μm) οι κόκκοι είναι ομοιογενείς όσον αφορά τη μορφολογία τους.



Σχήμα 3.4 Κλάσμα +75 μm . Άσπρη παιπάλη (αρ.) πλάτος εικόνας 15mm. Μαύρη παιπάλη (δεξ.) πλάτος εικόνας 6mm.



Σχήμα 3.5 Κλάσμα -75 +56 μm . Φαία παιπάλη (αρ.) πλάτος εικόνας 2,11mm. Μαύρη παιπάλη (δεξ.) πλάτος εικόνας 1,85mm.

3.2.3 Χημικές αναλύσεις παιπάλης

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι χημικές αναλύσεις των 10 δειγμάτων καθώς και οι αναλύσεις των μητρικών πετρωμάτων. Οι χημικές αναλύσεις έγιναν με το σύστημα φασματοσκοπίας ακτίνων-X φθορισμού με το σύστημα «S2 Ranger» του οίκου Brucker.

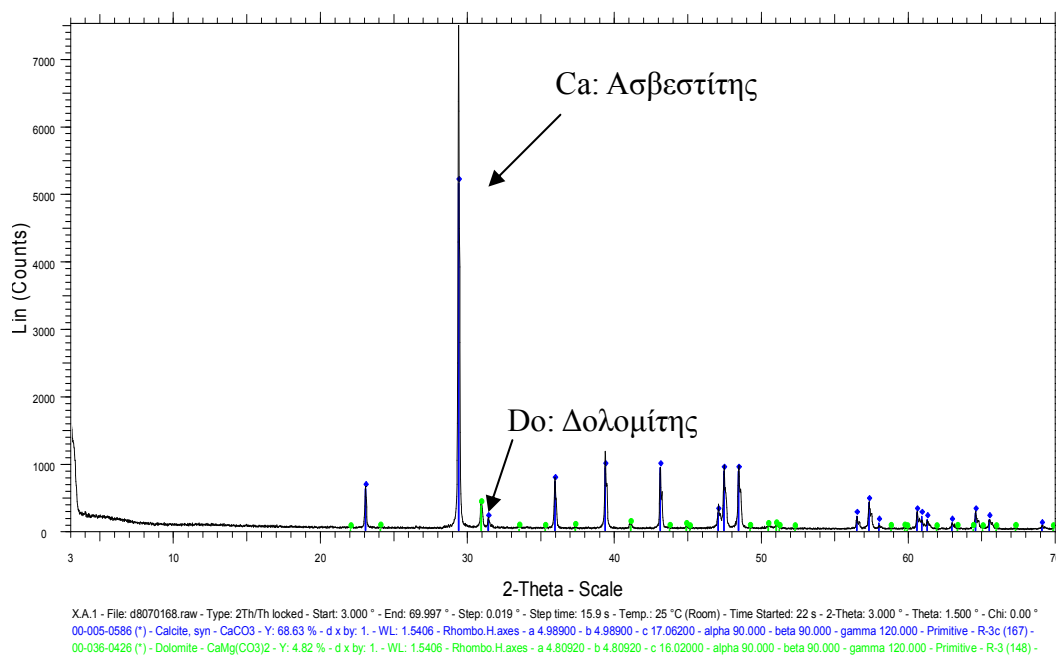
Πίνακας 3.1 Χημικές αναλύσεις δειγμάτων

Κωδ. δειγμ.	Περιγρ.	CaO %	Fe ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	MgO %	K ₂ O %	Na ₂ O %	CO ₂ %	CaCO ₃ %	CaMg(OH) ₂ %
8	Παιπάλη	55,11	0,21	0,53	0,12	0,25	<0,1	<0,1	43,90	98,41	<0,5
11	Παιπάλη	55,17	0,27	0,55	0,11	0,23	<0,1	<0,1	43,85	98,51	<0,5
13	Παιπάλη	53,46	0,21	0,48	0,16	1,68	<0,1	<0,1	43,86	91,17	7,8
14	Παιπάλη	53,76	0,25	0,63	0,21	1,48	<0,1	<0,1	43,75	92,07	6,7
19	Παιπάλη	53,06	0,165	0,49	0,19	1,48	<0,1	0,6	43,26	90,88	7,02
24	Παιπάλη	53,46	0,179	0,55	0,17	1,68	<0,1	<0,1	43,85	91,17	7,80
BR1	Μητρικό Πέτρωμα	55,44	0,03	0,26	0,10	0,24	<0,1	<0,1	43,89	99,00	<0,5
BR2	Μετρικό Πέτρωμα	55,34	0,03	0,36	0,10	0,23	<0,1	<0,1	43,90	98,83	<0,5

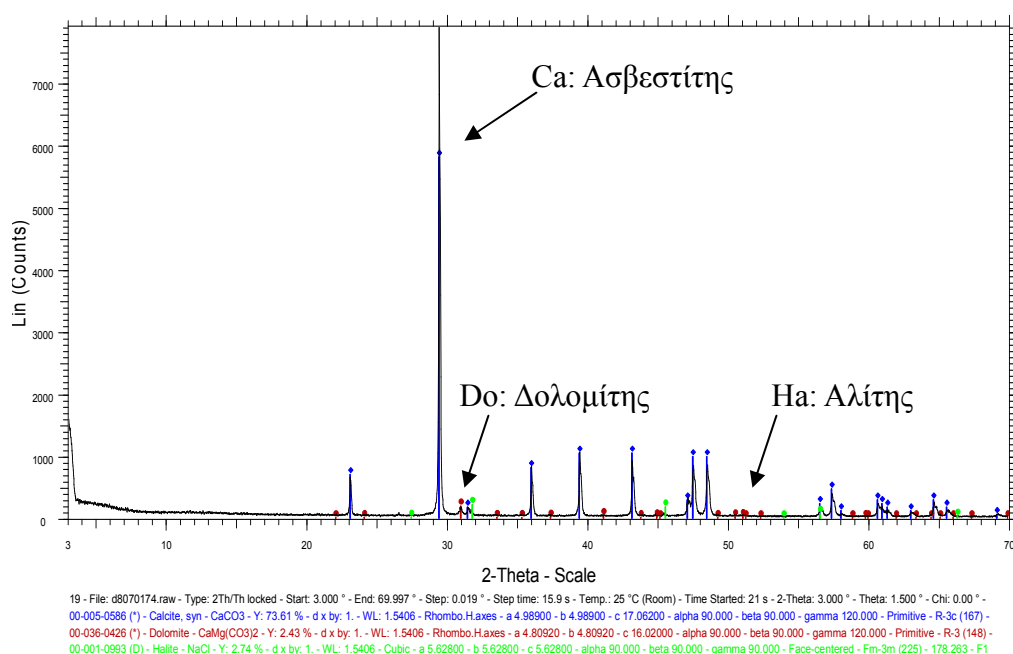
Παρατηρείται ότι τα δείγματα της παιπάλης έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε Fe₂O₃, SiO₂ και Al₂O₃ σε σχέση με τα δείγματα του μητρικού πετρώματος. Αυτό οφείλεται στην τάση που έχουν οι αργιλοπυριτικές προσμίξεις του ασβεστόλιθου να συγκεντρώνονται στα λεπτότερα κλάσματα.

3.2.4 Ορυκτολογικές αναλύσεις

Οι ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction), χρησιμοποιώντας το σύστημα αυτόματης περιθλασιμετρίας ακτίνων X τύπου D-500 της εταιρείας Siemens (Σχήματα 3.6-3.7).



Σχήμα 3.6 Ακτινοδιάγραμμα (X-Ray Diffraction) δείγματος λευκής παιπάλης. Αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη.



Σχήμα 3.7 Ακτινοδιάγραμμα (X-Ray Diffraction) δείγματος 19. Αποτελείται κυρίως από ασβεστίτη και σε ένα μικρότερο ποσοστό από δολομίτη και NaCl.

Με βάση τα παραπάνω ακτινοδιαγράμματα παρατηρείται ότι τα δείγματα που προέρχονται από τη λευκή παιπάλη εκτός από ασβεστίτη περιέχουν και δολομίτη. Τέλος το δείγμα 19 που προέρχεται από τη μαύρη παιπάλη αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από ασβεστίτη και σε μικρότερο από δολομίτη. Επιπλέον στο δείγμα 19 υπάρχει και ένα μικρό ποσοστό NaCl, γεγονός που εξηγείται από τη χρήση ελαφρά υφαιμυρισμένου νερού που χρησιμοποιείται για την διαβροχή της παιπάλης.

3.3. Σύνθεση μιγμάτων

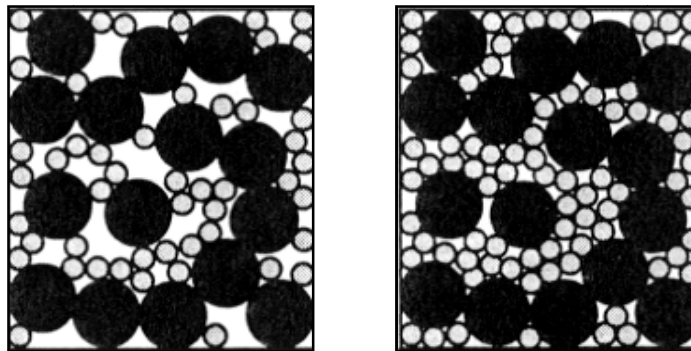
Η σύνθεση των μιγμάτων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος LISA-TM, όπου έχει δημιουργηθεί από την εταιρεία ELKEM Silicon Materials. Το συγκεκριμένο λογισμικό είχε σχεδιαστεί αρχικά για πυρίμαχα χυτεύματα αλλά έχει επεκταθεί ώστε να καλύπτει και μίγματα άλλων υλικών, όπως το σκυρόδεμα. Με το LISA-TM, μπορεί να καθοριστεί η σύνθεση αδρανών, τσιμεντού, έτσι ώστε η τελικά προκύπτουσα κοκκομετρική διαβάθμιση να είναι η βέλτιστη. Το πρόγραμμα έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό συνθέσεων μιγμάτων τσιμεντοκονιαμάτων και λειτουργεί σε δύο βασικές διαμορφώσεις:

- την διαμόρφωση μεγιστοποίησης των μηχανικών αντοχών μέσω βελτιστοποίησης της διάστρωσης των κόκκων και ακόλουθης αύξησης της πυκνότητας και
- την διαμόρφωση ελαχιστοποίησης του φαινομένου ιξώδους (Elkem Materials, 1997).

Το κριτήριο με το οποίο σχεδιάζεται μία σύνθεση, δηλαδή μεγιστοποίηση μηχανικών αντοχών ή αυξημένη ρεολογική ικανότητα του νωπού σκυροδέματος εξαρτάται από την πυκνότητα στοίβαξης που θα επιτευχθεί. Η πυκνότητα στοίβαξης είναι ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα αδρανή εντός του σκυροδέματος και είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά του υλικού (Μαρίνος κ.α, 2008).

Μεγιστοποίηση των μηχανικών αντοχών ενός υλικού συνεπάγει αυξημένη πυκνότητα στοίβαξης, δηλαδή η όσο το δυνατόν πυκνότερη διαβάθμιση μεταξύ των κόκκων των αδρανών. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται υψηλές μηχανικές αντοχές. Αυτό λόγω του ότι το συνδετικό υλικό (κονίαμα) είναι κατά κανόνα περισσότερο πορώδες και λιγότερο ανθεκτικό από το πέτρωμα των αδρανών και όσο λιγότερα είναι τα κενά μεταξύ των κόκκων αδρανών τόσο μεγαλώνει η μηχανική αντοχή και η πυκνότητα του σκυροδέματος (Οικονόμου, 1993).

Αντίθετα όταν το κριτήριο σχεδιασμού της σύνθεσης είναι η ελαχιστοποίηση του φαινομένου ιξώδους, απαιτείται αραιότερη πυκνότητα στοίβαξης. Με τον τρόπο αυτό το υλικό αυξάνει τη ρεολογική του ικανότητα (Σχήμα 3.8). Όμως η αύξηση των κενών μεταξύ των κόκκων αδρανών συνεπάγει και μείωση των μηχανικών αντοχών.



Σχήμα 3.8. Σχηματική αναπαράσταση της πυκνότητας στοίβαξης ενός δυαδικού συστήματος. Σύνθεση με αραιή κοκκομετρική διαβάθμιση (αριστερά)- Σύνθεση με πυκνή κοκκομετρική διαβάθμιση (δεξιά).

Επίσης σημαντικό να αναφερθεί, πως η επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος ανάλογα με το κριτήριο που σχεδιάζεται μία σύνθεση, εξαρτάται και από τη μορφολογία των κόκκων των αδρανών (Kwan and Fung, 2009). Κόκκοι σφαιρικού σχήματος εξυπηρετούν την επίτευξη της επιθυμητής ιδιότητας, ενώ αντίθετα κόκκοι ακανόνιστου σχήματος αποτελούν τροχοπέδη (Σχήμα 3.9).

Όταν το κριτήριο είναι η μεγιστοποίηση των μηχανικών αντοχών, δηλαδή ότι οι κόκκοι πρέπει να διατάσσονται κατά αυτόν τον τρόπο, ώστε κάθε ομάδα κόκκων, από άποψη διαμέτρου, να εισχωρεί στη θέση των κενών που

σχηματίζουν οι κόκκοι της αμέσως μεγαλύτερης ομάδας, κόκκοι ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος δεν εξυπηρετούν τη θεμελιώδη αυτή άποψη. Αυτό λόγω ότι δεν εφάπτονται απόλυτα μεταξύ τους με αποτέλεσμα την ύπαρξη περισσότερων κενών. Έχοντας ως κριτήριο την ελαχιστοποίηση του φαινόμενου ιξώδους, κόκκοι ακανόνιστου πολυγωνικού σχήματος υστερούν στη δυνατότητα κύλισής των, σε σύγκριση με κόκκους σφαιρικούς σχήματος.



Σχήμα 3.9 Μορφολογία κόκκων (σφαιρικού και ακανόνιστου σχήματος).

Τέλος η πυκνότητα στοίβαξης εξαρτάται και από την κατανομή μεγέθους των κόκκων των αδρανών που λαμβάνουν μέρος στη σύνθεση (Kwan and Fung, 2009). Όταν οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από μεγάλη κατανομή μεγέθους κόκκων, αυτό συμβάλλει στην επίτευξη της μεγιστοποίησης των μηχανικών αντοχών του σκληρυμένου σκυροδέματος. Αυτό λόγω της μείωσης των κενών εντός του νωπού σκυροδέματος.

Το πρόγραμμα LISA-TM προσδιορίζει την βέλτιστη αυτή κοκκομετρική διαβάθμιση με βάση το κριτήριο με το οποίο σχεδιάζουμε μία σύνθεση. Για τους υπολογισμούς του το λογισμικό χρησιμοποιεί τις εξισώσεις Andreassen.

3.3.1 Επιλογή και Χαρακτηριστικά του κοκκομετρικού μοντέλου

Andreassen

Η επιρροή της πυκνότητας στοίβαξης (packing density) των κόκκων στην ρεολογική ικανότητα και τις μηχανικές αντοχές που παρουσιάζει ένα υλικό ήταν γνωστή πριν το 1930. Θεωρήθηκε λοιπόν αναγκαία η εξεύρεση ειδικών κοκκομετρικών μοντέλων που θα βοηθούσαν στην καλύτερη κατανόηση του χαρακτηριστικού αυτού και συγχρόνως στην επίτευξη κατάλληλης πυκνότητας, ανάλογα με την ιδιότητα που επιθυμούνταν να χαρακτηρίζει ένα υλικό.

Το 1930, ο Andreassen κατασκεύασε ημι-εμπειρικά ένα από τα πρώτα κοκκομετρικά μοντέλα, όπου αναφερόταν στην πυκνότητα στοίβαξης κεραμικών υλικών, ενώ μετέπειτα προχώρησε και στην τροποποίηση του.

Το 1931, ακολούθησε ο Furnas, όπου κατασκεύασε ένα θεωρητικό και πολύπλοκο κοκκομετρικό μοντέλο που αναφερόταν στην διαβάθμιση κόκκων σφαιρικού σχήματος. Το μοντέλο βασίζεται στο γεγονός ότι οι μικρότεροι κόκκοι συμπληρώνουν τα «κενά» που υφίστανται ανάμεσα στους μεγαλύτερους κόκκους, χωρίς να επηρεάζουν τους δεύτερους.

Ο De Larrard, το 1999, προχώρησε στη δημιουργία ενός ακόμα νέου κοκκομετρικού μοντέλου. Το εν λόγω μοντέλο αναφέρεται σε πολλαπλών διαστάσεων κοκκώδη υλικά, λαμβάνοντας υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόκκων αυτών. Επίσης εμπεριέχονται σε αυτό πειραματικά προσδιοριστέοι παράμετροι (Stark and Mueller, 2003).

Για την παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκε καταλληλότερη η χρήση του μοντέλου Andreassen. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτό το κοκκομετρικό μοντέλο είναι πως θεωρείται το καταλληλότερο μοντέλο για σχεδιασμό συνθέσεων στις οποίες συμμετέχουν πολύ λεπτόκοκκα υλικά, όπως είναι η παιπάλη και τα υπερλεπτομερή πυριτικά (microsilica, silica fume).

Βάσει της προαναφερθείσας επιλογής, επιλέχθηκε και το λογισμικό LISA-TM, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στο κοκκομετρικό μοντέλο Andreassen. Το LISA, προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα:

- στην εξίσωση Andreassen και
- στην τροποποιημένη εξίσωση Andreassen.

Παρακάτω παρατίθενται και οι δύο τύποι των εξισώσεων Andreassen:

➤ Andreassen

$$CPFT = \left(\frac{d}{D} \right)^q \times 100$$

➤ Τροποποιημένη εξίσωση Andreassen

$$CPFT = \left(\frac{d^q - d_m^q}{D^q - d_m^q} \right) \times 100$$

Όπου:

CPFT (Cumulative Percent Finer Than) = το αθροιστικό ποσοστό του υλικού με διάμετρο μικρότερη από d

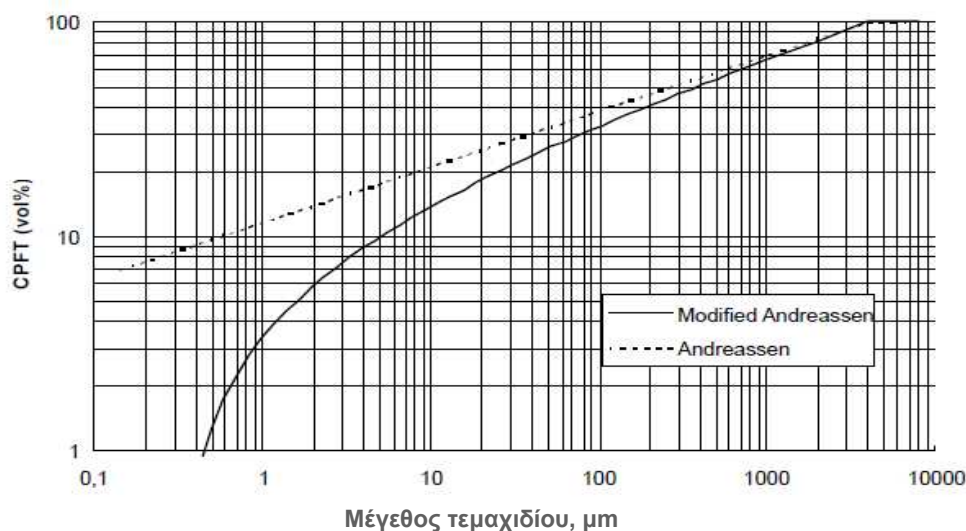
d = Μέγεθος κόκκου

d_m = Ελάχιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα

D = Μέγιστο μέγεθος κόκκου στο μίγμα

q = Παράμετρος μορφής της κοκκομετρικής καμπύλης

Στην τροποποιημένη εξίσωση Andreassen λαμβάνεται υπόψη το μέγιστο και το ελάχιστο μέγεθος κόκκου, ενώ στην απλή εξίσωση Andreassen υποθέτει μια άπειρη κατανομή προς το μικρότερο μέγεθος κόκκου και λαμβάνει υπόψη μόνο το μέγιστο μέγεθος κόκκου. Η τροποποιημένη εξίσωση του Andreassen παρίσταται ως καμπύλη, ενώ η απλή ως ευθεία γραμμή (Σχήμα 3.10) σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 3.10. Κοκκομετρικές καμπύλες των μοντέλων Andreassen.

Στόχος της χρήσης της εξίσωσης Andreassen είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη προσέγγιση της βέλτιστης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση επιτυγχάνεται όταν η καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης όλων των συστατικών της σχεδιαζόμενης σύνθεσης προσεγγίζει κατά τον μέγιστο δυνατό βαθμό την πρότυπη καμπύλη της εξίσωσης Andreassen.

Το λογισμικό LISA μέσω του μοντέλου Andreassen οδηγεί τον χρήστη στον προσδιορισμό της επιμέρους ποσότητας κάθε συστατικού με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η πρότυπη καμπύλη της εξίσωσης Andreassen, η οποία εκφράζει τη βέλτιστη κοκκομετρική διαβάθμιση μιας σύνθεσης, σύμφωνα με τον τύπο της τροποποιημένης εξίσωσης που προηγήθηκε, εξαρτάται από την κοκκομετρία των υλικών που λαμβάνουν μέρος, τα όρια των κοκκομετριών αυτών και τέλος από την παράμετρο q , η οποία εκφράζει τη πυκνότητα στοίβαξης.

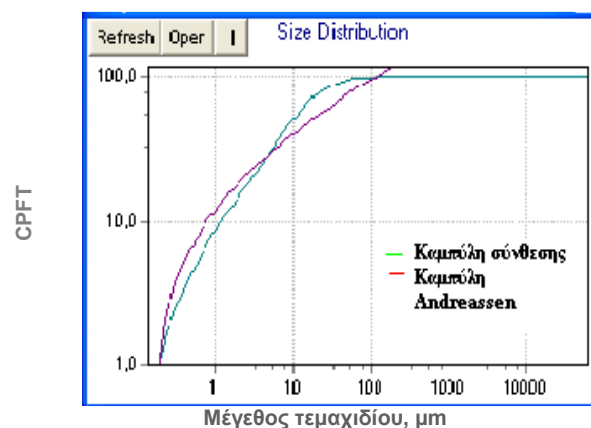
Τα άνω και κάτω όρια της κοκκομετρίας εκφράζονται με τις παραμέτρους «μέγιστος και ελάχιστος κόκκος». Σαν μέγιστος κόκκος θεωρείται το μέγεθος με διερχόμενο το 99% της κοκκομετρίας της εκάστοτε σύνθεσης, ενώ σαν ελάχιστος αυτό με συγκρατούμενο το 99%.

Η παράμετρος q εξαρτάται άμεσα από την ιδιότητα που έχει επιλεχθεί να χαρακτηρίζει το προς παρασκευήν σκυρόδεμα. Για πυκνές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, δηλαδή για υψηλές μηχανικές αντοχές, η παράμετρος q παίρνει τιμές μεγαλύτερες από 0,36. Εφόσον είναι επιθυμητό το μίγμα να έχει υψηλή ρεολογική ικανότητα, η παράμετρος q ορίζεται για τιμές μικρότερες από 0,30. Επίσης αν είναι επιθυμητό το σκυρόδεμα, που θα παρασκευαστεί, να χαρακτηρίζεται από ρεολογική ικανότητα, αλλά να έχει και ικανοποιητικές τιμές μηχανικών αντοχών, τότε η τιμή της παραμέτρου q ορίζεται μεταξύ του 0,30 και του 0,36.

Κριτήριο της βελτιστοποίησης της κοκκομετρικής διαβάθμισης μίας σύνθεσης, όπως προαναφέρθηκε είναι η απόκλιση της καμπύλης της σύνθεσης από την πρότυπη καμπύλη της εξίσωσης Andreassen (Σχήμα 3.11). Η κοκκομετρική καμπύλη της σύνθεσης (CPFT) προκύπτει βάση του σταθμικού μέσου όρου των επιμέρους κοκκομετριών (CPFT_i) των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν:

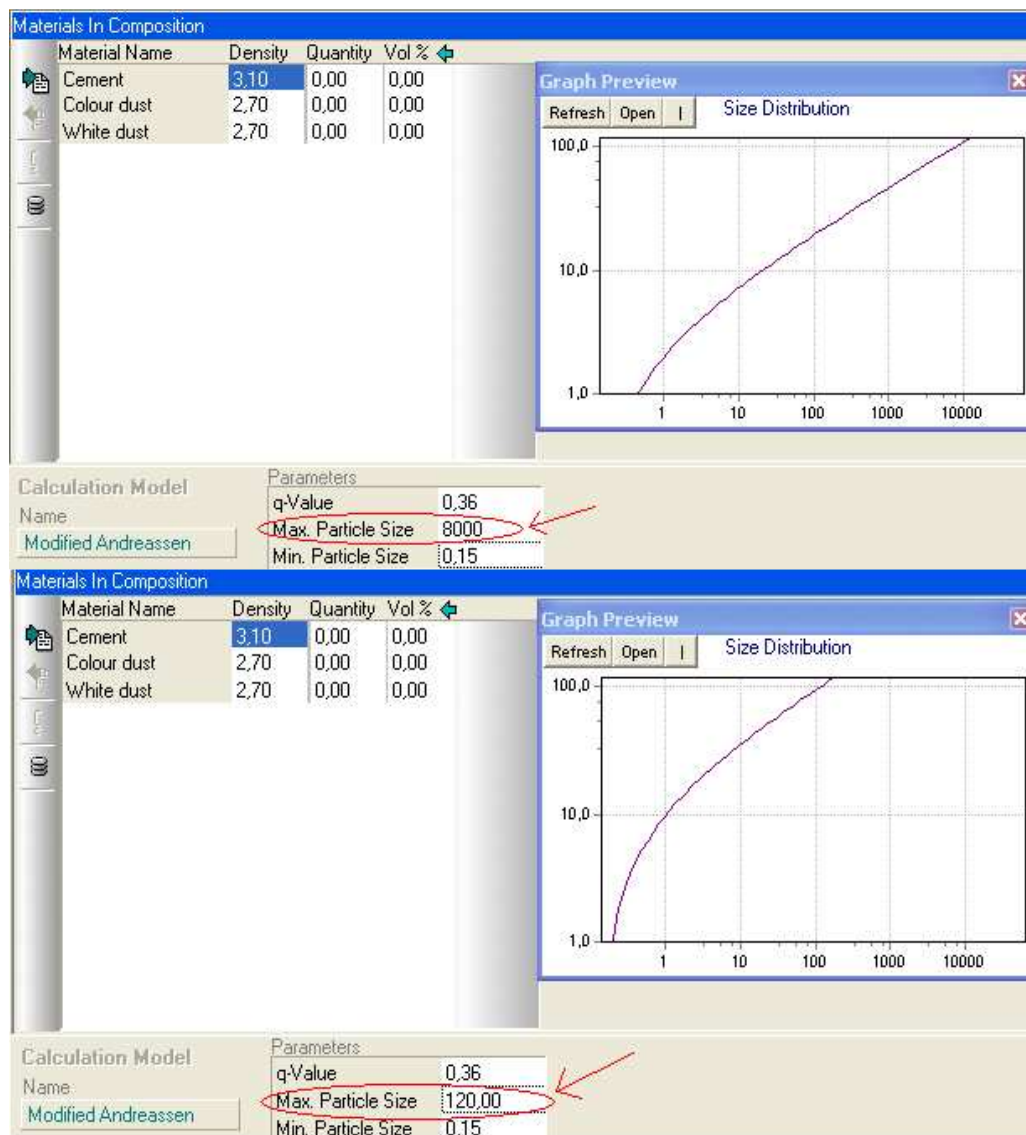
$$CPFT = \sum_{i=1}^n w_i * CPFT_i$$

όπου w_i δηλώνει τα ποσοστά συμμετοχής της κάθε πρώτης ύλης που λαμβάνει μέρος στη σύνθεση.

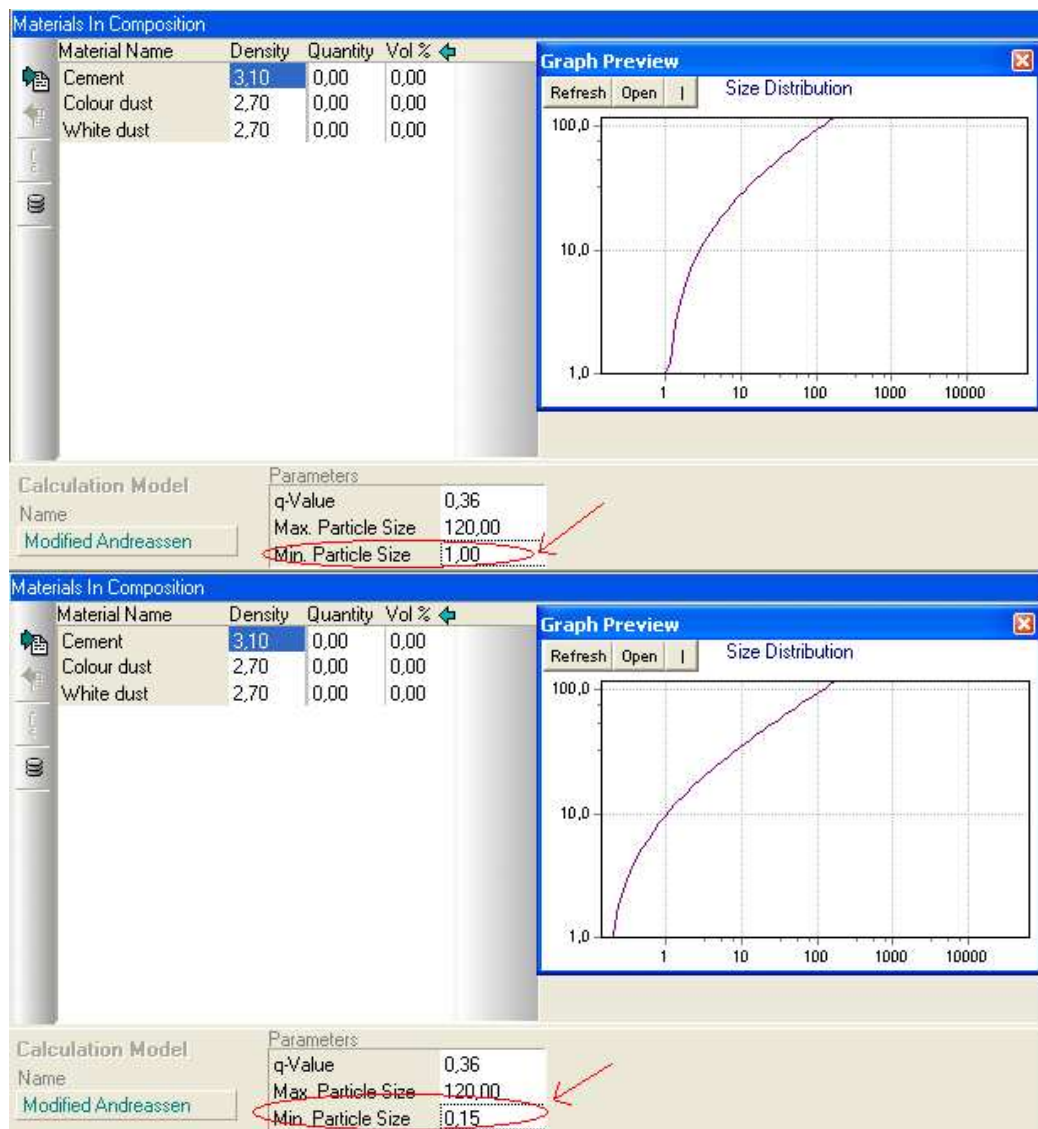


Σχήμα 3.11 Τυπική μορφή κοκκομετρικής καμπύλης πειραματικής σύνθεσης και της αντίστοιχης θεωρητικής με βάση από το μοντέλο Andreassen (λογισμικό LISA).

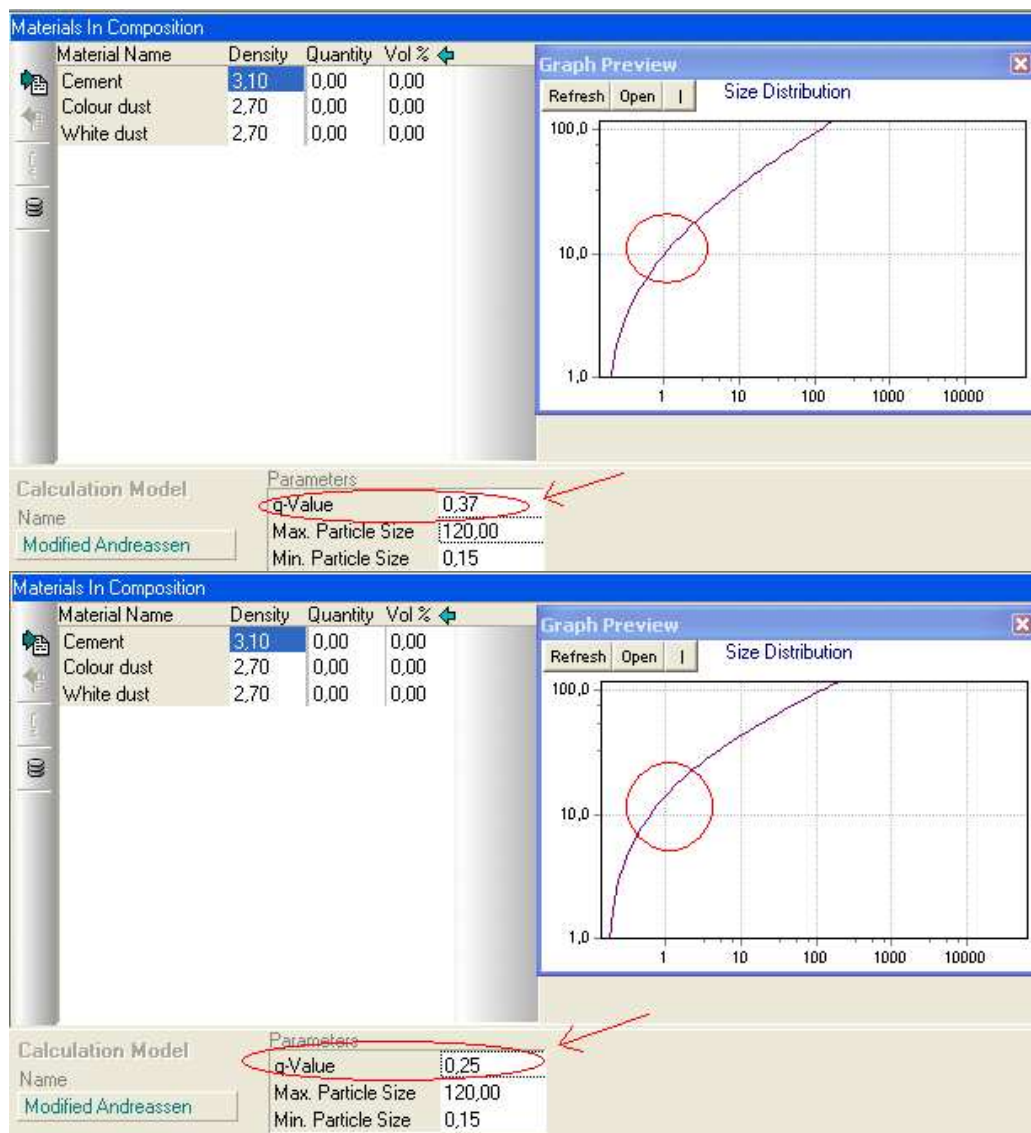
Για κάθε ένα συνδυασμό των παραμέτρων της εξίσωσης του Andreassen (d_m , D και q) αντιστοιχεί και μία διαφορετική πρότυπη καμπύλη. Παρακάτω παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις της τροποποιημένης εξίσωσης του Andreassen για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων (Σχήματα 3.12-3.14), όπως αυτές υπολογίστηκαν με βάση το λογισμικό LISA. Στα σχήματα αυτά δείχνεται παραστατικά η επίδραση κάθε παραμέτρου στη μορφή της πρότυπης καμπύλης κατά Andreassen.



Σχήμα 3.12 Επίδραση της μεταβολή της διαμέτρου του μέγιστου κόκκου στην μορφή της καμπύλης Andreassen. (Άξονας $x \rightarrow$ Μέγεθος κόκκου, μm . Άξονας $y \rightarrow$ Αθροιστικώς διερχόμενο, %.).

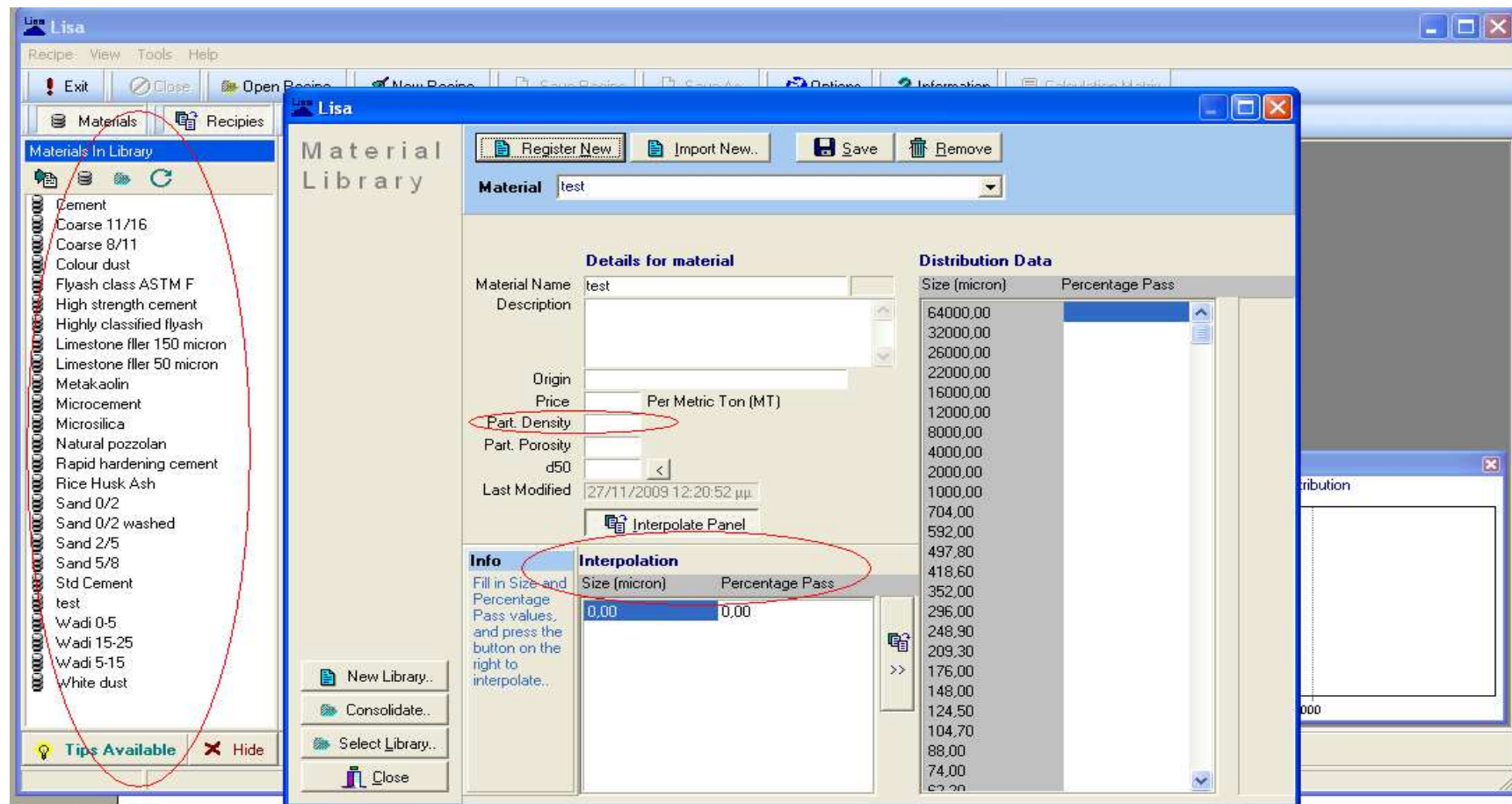


Σχήμα 3.13 Επίδραση της μεταβολή του μεγέθους του μικρότερου κόκκου στην μορφή της καμπύλης Andreassen. (Άξονας $x \rightarrow$ Μέγεθος κόκκου, μm . Άξονας $y \rightarrow$ Αθροιστικώς διερχόμενο, %).



Σχήμα 3.14 Επίδραση της μεταβολή του μεγέθους του μικρότερου κόκκου στην μορφή της καμπύλης Andreassen. (Άξονας $x \rightarrow$ Μέγεθος κόκκου, μm . Άξονας $y \rightarrow$ Αθροιστικώς διερχόμενο, %).

Το λογισμικό LISA παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει ένα πλήθος εμπορικών υλικών που οι κοκκομετρικές τους καμπύλες βρίσκονται στην βιβλιοθήκη του προγράμματος προκειμένου να υπολογίσει την κοκκομετρική καμπύλη της μιας σύνθεσης. Για μη συνήθη εμπορικά υλικά δίνεται η δυνατότητα να εισαχθεί στη βιβλιοθήκη τόσο η κοκκομετρία όσο και η πυκνότητα τους προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για το σχεδιασμό συνθέσεων (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15 Δημιουργία βάσης δεδομένων για την κοκκομετρία και την πυκνότητα υλικών.

3.4 Υπολογισμός συνθέσεων-Πειραματικός σχεδιασμός

3.4.1 Μεθοδολογία υπολογισμού της σύνθεσης

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης σύνθεσης με βάση το μοντέλο Andreassen ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

1. Καθορίστηκε το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε με βάση την αναμενόμενη χρήση του μικροσκυροδέματος. Με δεδομένο την έλλειψη προτύπων για τέτοια υλικά, η επιλογή βασίστηκε σε οικονομικά κριτήρια και στην υπάρχουσα γνώση από την τεχνολογία του συμβατικού σκυροδέματος.
2. Εισήχθηκαν τα δεδομένα των κοκκομετρικών αναλύσεων και των πυκνοτήτων όλων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για τις συνθέσεις μικροσκυροδέματος (λευκή παιπάλη, έγχρωμη παιπάλη και τσιμέντο) στη βάση δεδομένων του λογισμικού LISA.
3. Καθορίστηκαν οι παράμετροι του μοντέλου Andreassen: D , $d_{\min}$ και q . Η τιμή της παραμέτρου q της τροποποιημένης εξίσωσης Andreassen σχετίζεται με την πυκνότητα στοίβαξης και επηρεάζει τις αναμενόμενες ρεολογικές ιδιότητες της υπο προσδιορισμό σύνθεσης, καθώς και τις μηχανικές αντοχές του σκληρυμένου μικροσκυροδέματος. Η τιμή για το ελάχιστο μέγεθος κόκκου ορίστηκε στα $0,15\mu\text{m}$, ενώ για το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου ορίστηκε στα $120\mu\text{m}$. Για την παράμετρο q χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $q=0,25$ και $q=0,30$. Η τιμή $q=0,25$ επιλέχθηκε, γιατί θεωρείται ότι εξασφαλίζει το μειωμένο φαινόμενο ιξώδες που απαιτείται για την ιδιότητα της αυτοσυμπύκνωσης (self compaction), ενώ η τιμή $q=0,30$ επελέγη ώστε να εξασφαλίζει βελτιωμένες αντοχές με αποδεκτό όμως μικροκώνο εξάπλωσης. Να διευκρινιστεί εδώ ότι μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου q έχουν σαν επίδραση την σύνθεση καλύτερα κατανεμημένων κοκκομετρικών καμπυλών, άρα και καλύτερης «διάστρωσης» (packing) των κόκκων, με συνακόλουθη αύξηση των τελικών αντοχών. Αποτελεί στην ουσία ένα συμβιβασμό

ανάμεσα στην επίτευξη μέγιστων μηχανικών αντοχών και της καλύτερης ρεολογικής συμπεριφοράς.

4. Υπολογίστηκε η βέλτιστη σύνθεση (ποσοστό έγχρωμης και λευκής παιπάλης καθώς και τσιμέντου) με διαδοχικές δοκιμές, συγκρίνοντας την κοκκομετρική καμπύλη της εκάστοτε προκύπτουσας σύνθεσης με εκείνη της πρότυπης. Ως βέλτιστη επιλέχθηκε εκείνη που παρουσίαζε την μικρότερη απόκλιση από την πρότυπη. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στην ταύτιση των καμπυλών στα μικρότερα κοκκομετρικά κλάσματα.

Μετά τον υπολογισμό των αναλογιών των υλικών καθορίστηκαν οι ποσότητες του νερού και των ειδικών χημικών πρόσμικτων που θα χρησιμοποιηθούν. Για τα χημικά πρόσθετα συνήθως υπάρχουν κάποιες προτεινόμενες τιμές από τον κατασκευαστή τους που αναφέρονται στη συνήθη και τη μέγιστη επιτρεπόμενη δοσολογία. Στη παρούσα διπλωματική εργασία τα χημικά πρόσμικτα που χρησιμοποιήθηκαν είναι υπερρευστοποιητής και πλαστικοποιητής. Το πρώτο μειώνει την ποσότητα νερού που απαιτείται για το επιθυμητό ιξώδες του νωπού σκυροδέματος, ενώ ταυτόχρονα μειώνει το λόγο νερού/τσιμέντου, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση των μηχανικών αντοχών. Το δεύτερο χρησιμοποιείται για την επίτευξη συνεκτικότητας, ομοιογένειας και ισοτροπίας του σκυροδέματος. Τέλος η απαιτούμενη ποσότητα νερού για το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα (και για τις δεδομένες δοσολογίες προσμίκτων) καθορίστηκε κατά τη διάρκεια παρασκευής των μιγμάτων με βάση την τιμή του κώνου εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος.

3.4.2 Πειραματικός σχεδιασμός.

1^{ος} Πειραματικός σχεδιασμός

Με γνώμονα το όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος των προτεινόμενων συνθέσεων επελέγη κατ'αρχήν μια σύνθεση περιεκτικότητας σε τσιμέντο της τάξης του 10% επί αδρανών.

Στην πρώτη κοκκομετρική προσέγγιση με την βοήθεια του λογισμικού LISA, επετεύχθη ικανοποιητική προσέγγιση της καμπύλης κατανομής του υπό διερεύνηση μίγματος και της τροποποιημένης καμπύλης Andreassen με

περιεκτικότητα τσιμέντου 7,5% επί συνόλου αδρανών. Η σύνθεση αυτή (με τον κωδικό Α) θα αποτελούσε μία πολύ συμφέρουσα λύση για την μαζική αξιοποίηση της λατομικής ασβεστολιθικής παιπάλης, εφόσον οι τελικές μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου προϊόντος αποδεικνύονταν κατάλληλες κατασκευαστικές χρήσεις χαμηλών απαιτήσεων. Οι δοσολογίες υπερρευστοποιητή και πλαστικοποιητή αυτοσυμπύκνωσης ρυθμίστηκαν στην μέγιστη κατά τον κατασκευαστή τιμή σε μια προσπάθεια βελτιστοποίησης των ιδιοτήτων τόσο του νωπού, όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Για περαιτέρω μείωση του κόστους σχεδιάστηκαν τρεις ακόμα συνθέσεις με το ίδιο ποσοστό σε τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε και στην Α, αλλά με διαφορετικές δοσολογίες στα ειδικά χημικά πρόσμικτα καθώς και δύο ακόμη συνθέσεις με τις ίδιες περιεκτικότητες σε αδρανή και τσιμέντο, αλλά με διαφορετικό κώνο εξάπλωσης (κωδικοί Β,Γ,Δ). Η αλλαγή του κώνου εξάπλωσης σημαίνει πως αλλάζει η ποσότητα του νερού στις δύο συνθέσεις, δηλαδή αλλαγή στην ρευστότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του προς παρασκευήν σκυροδέματος.

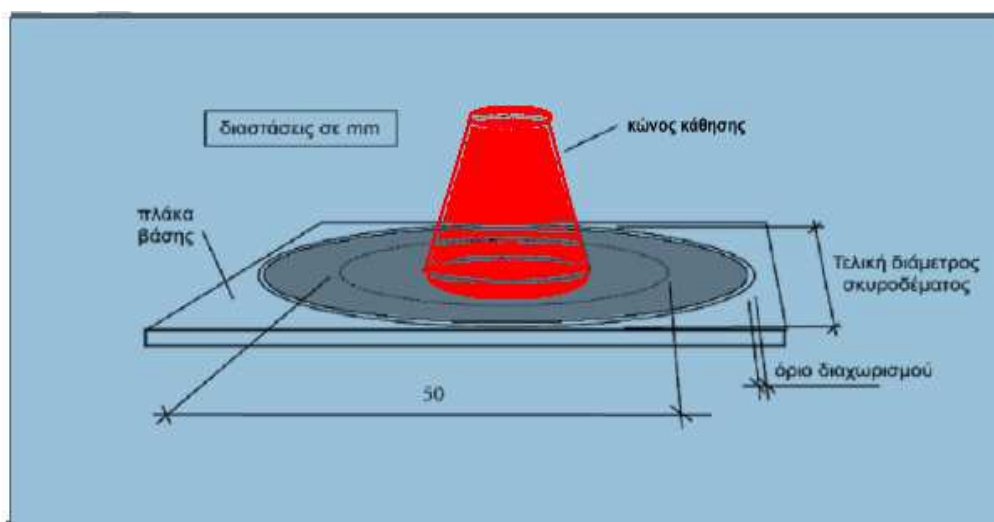
Κατά την δεύτερη κοκκομετρική προσέγγιση με την βοήθεια του λογισμικού, και πάντα διατηρώντας την περιεκτικότητα του τσιμέντου στην περιοχή αυτή, σχεδιάστηκαν συνθέσεις περιεκτικότητας σε τσιμέντο 10,8% (κωδικοί Γ2, Δ2), Η μικρή αύξηση του τσιμέντου στόχευε σε αύξηση των αντοχών και των ρεολογικών χαρακτηριστικών του νωπού μικροσκυροδέματος, στα ίδια όμως χαμηλά επίπεδα κόστους.

2^{ος} Πειραματικός σχεδιασμός

Κατά την δεύτερη πειραματική προσέγγιση, και σε μια προσπάθεια ικανοποίησης τεχνικών απαιτήσεων δομικών υλικών υψηλότερων προδιαγραφών, το ποσοστό του τσιμέντου διερευνήθηκε στην περιοχή 25% επί αδρανών. Συγκεκριμένα κατά τον προσδιορισμό των ποσοστών των επί μέρους συστατικών με την βοήθεια του λογισμικού LISA, αυτό ρυθμίστηκε στην τιμή 24,9%, ενώ ο υπερρευστοποιητής, ρυθμίστηκε σε κατά τι μικρότερη δοσολογία της μέγιστης.

3.4.3 Η δοκιμή «Μικροκώνου εξάπλωσης»

Η ποσότητα νερού που θα εισαχθεί στο μίγμα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, καθορίστηκε από την τιμή της δοκιμής του κώνου εξάπλωσης. Με βάση το μέτρο εξάπλωσης εκτιμάται συνήθως η ικανότητα πλήρωσης του μείγματος που παρασκευάζεται. Για τη μέτρηση αυτή χρειάζεται ένας συνηθισμένος κώνος κάθισης και μία μεταλλική επιφάνεια. Ο κώνος γεμίζεται σε μία στρώση και στη συνέχεια ανασηκώνεται αφήνοντας το σκυρόδεμα να εξαπλωθεί. Λόγω της ρευστότητας του μίγματος σχηματίζεται μία επιφάνεια στρογγυλή (Σχήμα 3.16). Το μέτρο εξάπλωσης ισούται με το μέσο όρο δύο κάθετων μεταξύ τους διαμέτρων της επιφάνειας αυτής (Σιδέρης, 2008).



Σχήμα 3.16 Συσκευή μέτρησης του μέτρου εξάπλωσης του νωπού σκυροδέματος.

Για να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος, με στόχο να προσδιοριστεί η ποσότητα του νερού για να επιτευχθεί το επιθυμητό μέτρο εξάπλωσης, χρειάζεται η χρήση κατάλληλου κώνου. Για τον έλεγχο μικροσκυροδέματος όπου η μέγιστη διάμετρος του κόκκου των αδρανών (~120μm) είναι πολύ μικρότερη του αντίστοιχου κόκκου του SCC μπορεί να χρησιμοποιηθεί κώνος μικρότερων διαστάσεων από αυτόν που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (Brouwers, 2005). Με βάση αυτό κατασκευάστηκε κώνος με διαστάσεις 21mm η μικρή διάμετρος, 40mm η μεγάλη διάμετρος και ύψος 60mm (Σχήμα 3.17), έτσι ώστε ο λόγος του μικρότερου κόκκου του υλικού που χρησιμοποιήθηκε προς το

ύψος του προαναφερθέντος κώνου, να είναι μικρότερος ή τουλάχιστον ίσος με αυτόν που χρησιμοποιείται στην τεχνολογία του SCC σήμερα (δεν υπάρχει τυποποιημένη τιμή). Όταν το μέτρο εξάπλωσης που είχε προσδιοριστεί πριν την έναρξη του πειράματος, ήταν το επιθυμητό, σταματούσε η περαιτέρω εισαγωγή νερού στο μίγμα.



Σχήμα 3.17 Μικροκόνος για το μέτρο εξάπλωσης.

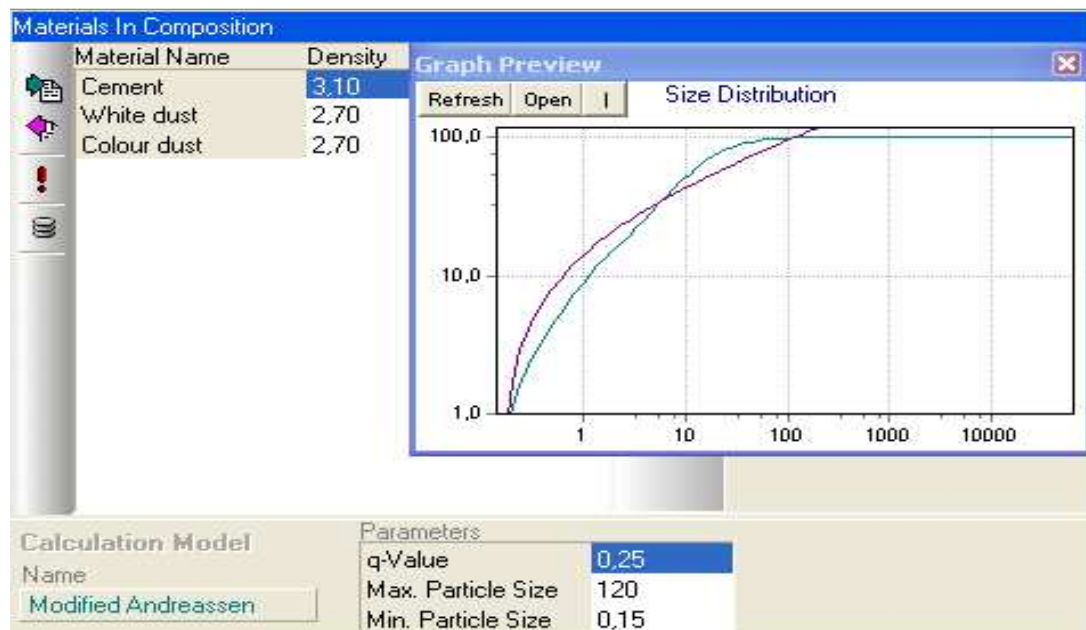
3.4.4 Στοιχεία συνθέσεων

Όλες οι συνθέσεις σχεδιάστηκαν με γνώμονα να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από την πρότυπη καμπύλη Andreassen, δηλαδή να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη κοκκομετρική διαβάθμιση στο βαθμό που επιτρέπεται με τις κοκκομετρίες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή δοκιμίων. Επίσης ορίστηκε ως κοινή αρχή για όλες τις συνθέσεις, πως για να είναι αποδεχτές θα πρέπει οι συντεταγμένες «επί τη αρχή» των κοκκομετρικών καμπυλών των μιγμάτων να είναι κοινές με αυτές της πρότυπης καμπύλης Andreassen.

Σύνθεση Α

Στη σύνθεση αυτή το ποσοστό τσιμέντου ήταν 7,5%, αφού ο στόχος για τα μίγματα αυτά ήταν να διερευνηθεί αν είναι κατάλληλα για παραγωγή SCμC χαμηλών αντοχών κατάλληλων για υλικά πλήρωσης επιπέδων και επιφανειών. Η τιμή της παραμέτρου q , που ορίστηκε για να προσδώσει υψηλή ρεολογική ικανότητα, ήταν 0,25.

Με βάση το μοντέλο Andreassen και με τη χρήση του λογισμικού LISA έγινε μια σειρά από υπολογισμούς με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος και υπολογίστηκε η βέλτιστη σύνθεση παιπάλης λευκής, παιπάλης έγχρωμης και τσιμέντου. Η λευκή παιπάλη σε ποσοστό 40,42% επί των συνολικών στερεών και η έγχρωμη παιπάλη σε ποσοστό 52,53%. Η κοκκομετρική καμπύλη της βέλτιστης σύνθεσης που επιλέχθηκε δίνεται στο Σχήμα 3.18, όπου η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στην βέλτιστη κοκκομετρική καμπύλη, ενώ η κόκκινη στην πρότυπη καμπύλη Andreassen.



Σχήμα 3.18 Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης Α (πράσινη καμπύλη) και πρότυπη καμπύλη Andreassen (κόκκινη καμπύλη).

Στη συνέχεια καθορίστηκαν τα ποσοστά υπερρευστοποιητή και πλαστικοποιητή στη μέγιστη συνιστώμενη από τον κατασκευαστή δοσολογία και έγινε σταδιακά η προσθήκη νερού στο μίγμα έως επίτευξης κώνου εξάπλωσης 13cm που είχε οριστεί. Η τιμή των 13cm εξασφαλίζει τις απαιτούμενες ρεολογικές ιδιότητες στο μικροσκυρόδεμα για χρήση ως πληρωτικό υλικό και για αυτοεπιπέδωση.

Συνθέσεις Β-Γ-Δ

Αλλάζοντας μόνο τις ποσότητες του υπερρευστοποιητή και του πλαστικοποιητή στη σύνθεση Α, σχεδιάστηκαν τρεις ακόμα συνθέσεις. Η σύνθεση Β είχε μέγιστη

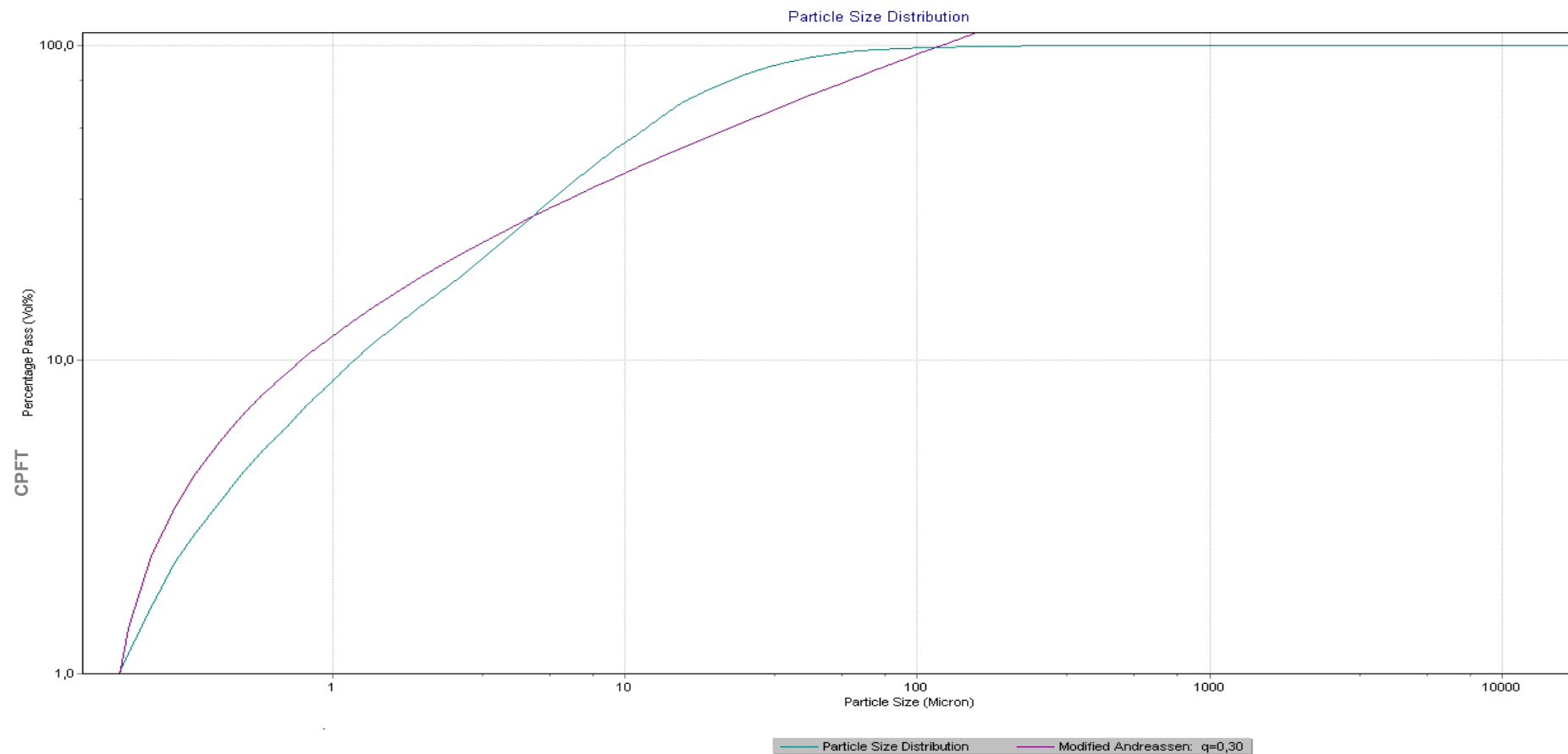
δοσολογία υπερρυστοποιητή και μέση δοσολογία πλαστικοποιητή, ενώ η σύνθεση Γ είχε μέση δοσολογία υπερρυστοποιητή και μέγιστη δοσολογία πλαστικοποιητή. Ακόμη η σύνθεση Δ είχε μέση δοσολογία υπερρυστοποιητή και μέση δοσολογία πλαστικοποιητή. Η διαφορά στις δοσολογίες ειδικών χημικών πρόσμικτων που υπήρχε είχε ως αποτέλεσμα και την διαφορετική ποσότητα νερού που χρειάστηκε η κάθε σύνθεση για να επιτευχθεί ο κώνος εξάπλωσης που σε κάθε σύνθεση είχε οριστεί να είναι 13cm.

Συνθέσεις Γ_2 - Δ_2

Στις συνθέσεις αυτές το ποσοστό τσιμέντου επί των αδρανών ήταν 10,80% και η παράμετρος q ορίστηκε να είναι 0,30, αφού στόχος για τα μίγματα αυτά ήταν να διερευνηθεί αν είναι κατάλληλα για παραγωγή SCμC ικανοποιητικών μηχανικών αντοχών και ικανοποιητικής ρεολογικής ικανότητας.

Με βάση το μοντέλο Andreassen υπολογίστηκε η βέλτιστη σύνθεση παιπάλης λευκής και έγχρωμης και τσιμέντου. Με διαδοχικές δοκιμές (δοκιμή και λάθος) επιλέχθηκαν ως βέλτιστα τα ποσοστά: η έγχρωμη παιπάλη σε ποσοστό 62,9% επί του συνόλου στερεών και η λευκή παιπάλη σε ποσοστό 27%. Η κοκκομετρική καμπύλη της βέλτιστης σύνθεσης που επιλέχθηκε δίνεται στο Σχήμα 3.19. Στη συνέχεια καθορίστηκαν τα ίδια ποσοστά υπερρυστοποιητή και πλαστικοποιητή και για τις δύο συνθέσεις στη μέγιστη συνιστώμενη από τον κατασκευαστή δοσολογία.

Η διαφορά ανάμεσα στις συνθέσεις Γ_2 και Δ_2 ήταν, ότι στην Γ_2 ορίστηκε κώνος εξάπλωσης το 9,5cm, ενώ στην Δ_2 ορίστηκε ως κώνος εξάπλωσης το 8,8cm. Λόγω του διαφορετικού κώνου εξάπλωσης απαιτήθηκε και διαφορετική ποσότητα του νερού. Η αλλαγή του κώνου εξάπλωσης πραγματοποιήθηκε για να μελετηθεί η επίδραση η ποσότητα του νερού στις ιδιότητες του σκυροδέματος.

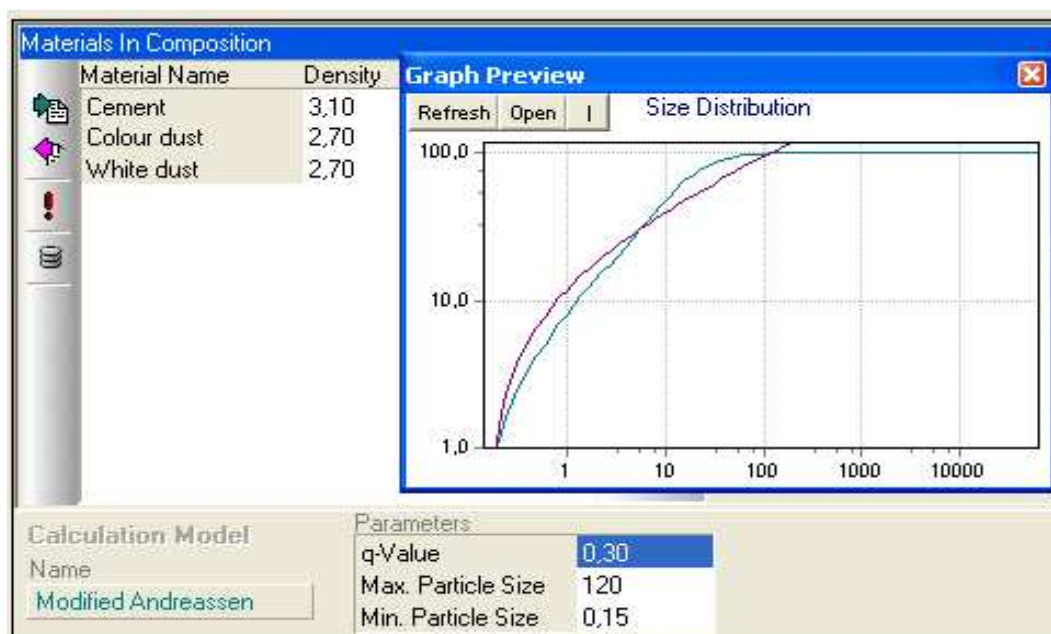


Σχήμα 3.19 Κοκκομετρική καμπύλη συνθέσεων Γ_2 και Δ_2 (πράσινη καμπύλη) και πρότυπη καμπύλη Andreassen (κόκκινη καμπύλη)

Σύνθεση A₂

Στη σύνθεση A₂ το ποσοστό τσιμέντου ήταν 24,9% επί των αδρανών, αφού στόχος για αυτά τα μίγματα ήταν να διερευνηθεί αν είναι κατάλληλα για παραγωγή SCμC υψηλών μηχανικών αντοχών για υποστρώματα δαπέδων. Η παράμετρος q δεν μεταβλήθηκε και παρέμεινε στα 0,30, όπως και στις Γ₂ και Δ₂ συνθέσεις.

Με βάση τη βέλτιστη κοκκομετρική σύνθεση, το ποσοστό της λευκής παιπάλης ορίστηκε στο 41,9% επί του συνόλου στερεών και το ποσοστό της έγχρωμης παιπάλης στο 38% αντίστοιχα. Στη συνέχεια καθορίστηκαν τα ποσοστά υπερρευστοποιητή και πλαστικοποιητή στη μέγιστη συνιστώμενη δοσολογία. Παρακάτω παρουσιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη της σύνθεσης A₂ (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20 Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης A₂ (πράσινη καμπύλη) και πρότυπη καμπύλη Andreassen (κόκκινη καμπύλη).

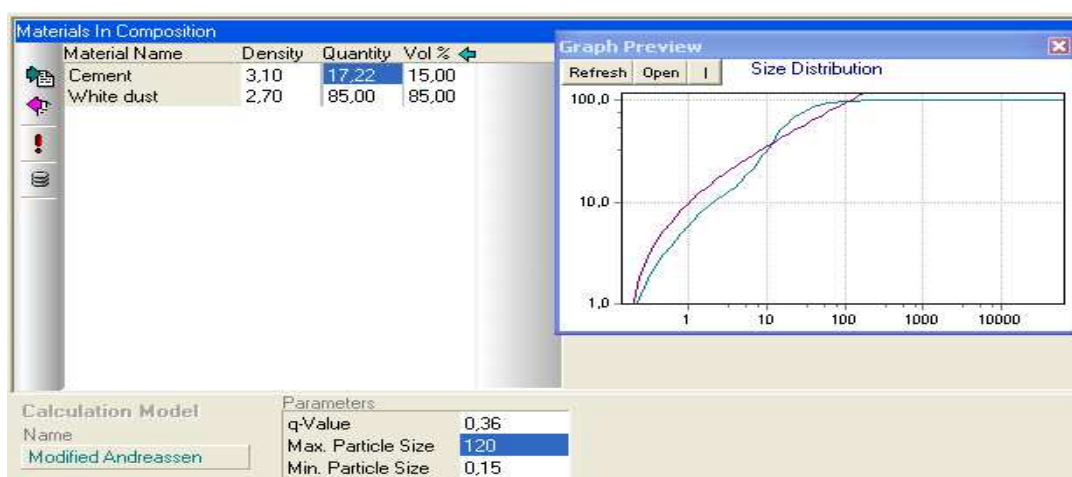
Επίσης παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 3.2 όπου περιέχει πληροφορίες σχετικά με όλες τις συνθέσεις που σχεδιάστηκαν:

Πίνακας 3.2 Στοιχεία των συνθέσεων του SCμC και προηγούμενων ερευνών.

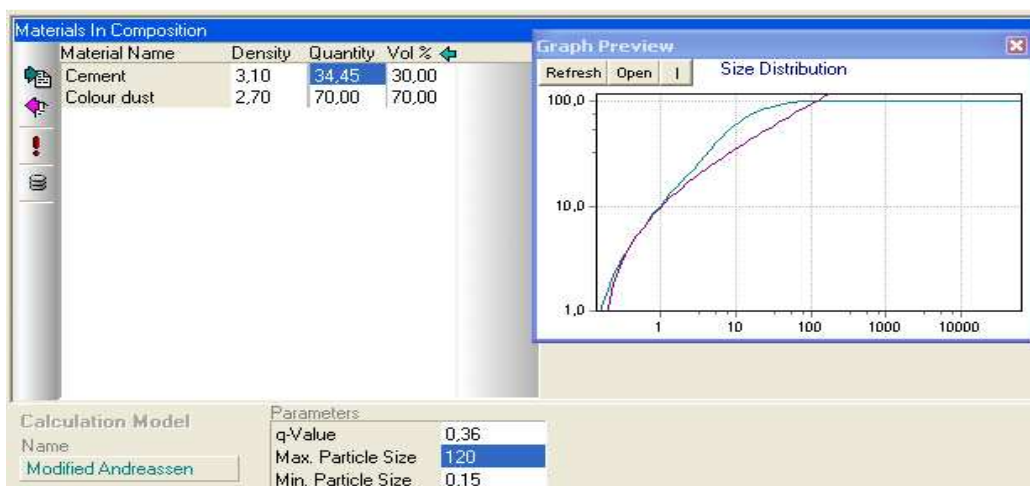
Κωδικός σύνθεσης	Δοσολογία Υπερρευσ- τοποιητή g/100kg παιπάλης και τσιμέντου	Δοσολογία πλαστικοπ- οιητή g/100kg παιπάλης και τσιμέντου	Ποσοστό % Νερού επί του συνόλου στερεών	Έγχρωμη/ Λευκή Παιπάλη	Ποσοστό τσιμέντου % επί της παιπάλης
A	1,59	0,19	27,5	1,29	7,5
B	1,59	0,095	29,3	1,29	7,5
Γ	0,795	0,19	36	1,29	7,5
Δ	0,795	0,095	39	1,29	7,5
Γ ₂	1,1	0,13	30,48	2,3	10,80
Δ ₂	1,1	0,13	25,78	2,3	10,80
A ₂	1,2	0,15	23,4	0,90	24,88
K ₁	1,59	0,19	25,22	Μόνο Έγχρωμη Παιπάλη	15
K ₂	1,59	0,19	25,22	Μόνο Λευκή Παιπάλη	30
K ₃	1,59	0,19	29,31	Μόνο Έγχρωμη Παιπάλη	30

Στον παραπάνω πίνακα εκτός από τις συνθέσεις που σχεδιάστηκαν για την παρούσα διπλωματική εργασία, παρατίθενται και οι συνθέσεις K₁-K₂-K₃ που σχεδιάστηκαν κατά τη διάρκεια προηγούμενης διερεύνησης για λόγους σύγκρισης (Λεβεντάκης,

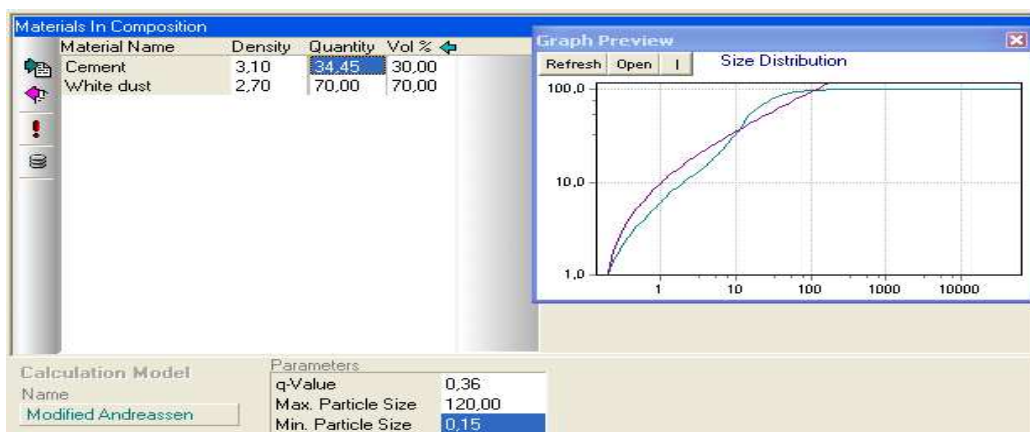
2009). Για τις συνθέσεις αυτές δεν έγινε καθορισμός των ποσοστών των τύπων παιπάλης με το κοκκομετρικό κριτήριο Andreassen. Επίσης οι συνθέσεις αυτές είχαν υψηλότερο ποσοστό τσιμέντου και μικρότερο κώνο εξάπλωσης, αφού στόχο είχαν την παραγωγή μικροσκυροδέματος υψηλής αντοχής κατάλληλο για παραγωγή ειδικών δομικών στοιχείων με διαδικασία χύτευσης (castable microconcrete). Για την εξαγωγή συμπερασμάτων κατασκευάστηκαν και σε αυτές τις συνθέσεις οι κοκκομετρικές τους καμπύλες και συγκρίθηκαν με την πρότυπη καμπύλη Andreassen για $q=0,36$. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης αυτής δίνονται στα σχήματα 3.21-3.23 τους ακολουθούν παρακάτω:



Σχήμα 3.21 Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης K_1 (πράσινη καμπύλη) και πρότυπη καμπύλη Andreassen (κόκκινη καμπύλη).



Σχήμα 3.22 Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης K₂ (πράσινη καμπύλη) και πρότυπη καμπύλη Andreassen (κόκκινη καμπύλη).



Σχήμα 3.23 Κοκκομετρική καμπύλη σύνθεσης K₃ (πράσινη καμπύλη) και πρότυπη καμπύλη Andreassen (κόκκινη καμπύλη).

Παρατηρείται πως καμία από τις συνθέσεις δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από την πρότυπη καμπύλη Andreassen και ειδικά η K₃ σύνθεση που παρουσιάζεται στην Σχήμα 3.23, που όπως φαίνεται εξυπηρετεί τη συνθήκη που έχει οριστεί, που πρέπει δηλαδή οι δύο καμπύλες να ξεκινούν από το ίδιο σημείο.

Κεφάλαιο 4. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.1 Διαδικασία παρασκευής δοκιμών

Αρχικά έχοντας όλες τις περιεκτικότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιούνταν, γινόταν η αναγωγή αυτών των περιεκτικότητων σε γραμμάρια. Στην συνέχεια ακολουθούσε η επιμέρους ζύγιση της ποσότητας κάθε υλικού. Λόγω των μικρών ποσοτήτων όλων των υλικών και όπως καταδείχθηκε από το συνολικό πρόγραμμα δοκιμών, είναι απαραίτητη η ακρίβεια όλων των ζυγίσεων μέχρι το εκατοστό του g, ακρίβεια που προσέφερε η ζυγαριά που χρησιμοποιήθηκε. Το συνολικό βάρος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη παρασκευή δοκιμών, με βάση τη συνταγή που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά ήταν 2kg, χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν το νερό και τα ειδικά χημικά πρόσμικτα που χρειάστηκαν να προστεθούν.

Μετά την ζύγιση όλα τα υλικά, δηλαδή το τσιμέντο, οι υπερρευστοποιητές, και τέλος τα 3 είδη παιπάλης (λευκή, μαύρη, φαιά) τοποθετούνταν σε αναμικτήρα βίαιης ανάμιξης, ώστε να διαλυθούν πιθανά συσσωματώματα. Στη συνέχεια τοποθετούνταν στον εργαστηριακό αναμικτήρα (Σχήμα 4.1) στον οποίο είχε ήδη τοποθετηθεί η προζυγισμένη ποσότητα νερού στην οποία είχαν διαλυθεί οι αντίστοιχες μικροποσότητες χημικών πρόσμικτων. Η ποσότητα νερού καθοριζόταν από την διάμετρο του κώνου εξάπλωσης που απαιτούνταν. Η διαδικασία της ανάμιξης έγινε με την συνήθη ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 4.1 Εργαστηριακός αναμικτήρας κονιαμάτων (mortar mixer).

Έπειτα το μίγμα που είχε τον επιθυμητό κώνο εξάπλωσης, τοποθετούνταν σε κυβικές και πρισματικές μήτρες διαστάσεων $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ και $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ αντίστοιχα. Μετά το πέρας δύο έως τριών ημερών τα δοκίμια απομακρύνονταν από τις μήτρες και ακολουθούσε η διαδικασία ωρίμανσης. Η ωρίμανση των δοκιμίων έλαβε χώρα, κατ' αντιστοιχία με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος, σε εργαστηριακό θάλαμο ωρίμανσης της εταιρείας MATEST, σε θερμοκρασία $20 \pm 1^\circ \text{C}$ και υγρασία κατ' ελάχιστο 95% για 27 ημέρες. Στην συνέχεια παρέμειναν σε συνθήκες περιβάλλοντος για 1 ημέρα, προ της διεξαγωγής των εργαστηριακών δοκιμών.

4.2 Εργαστηριακές μετρήσεις

Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Μετά το πέρας των 28 ημερών, έγινε η μέτρηση των διαστάσεων και του βάρους των δοκιμίων και ακολούθησε η διαδικασία της δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη στα σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C109. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στα κυβικά δοκίμια και η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην εικόνα του Σχήματος 4.2.



Σχήμα 4.2 Διάταξη για έλεγχο αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Δοκιμή αντοχής σε κάμψη

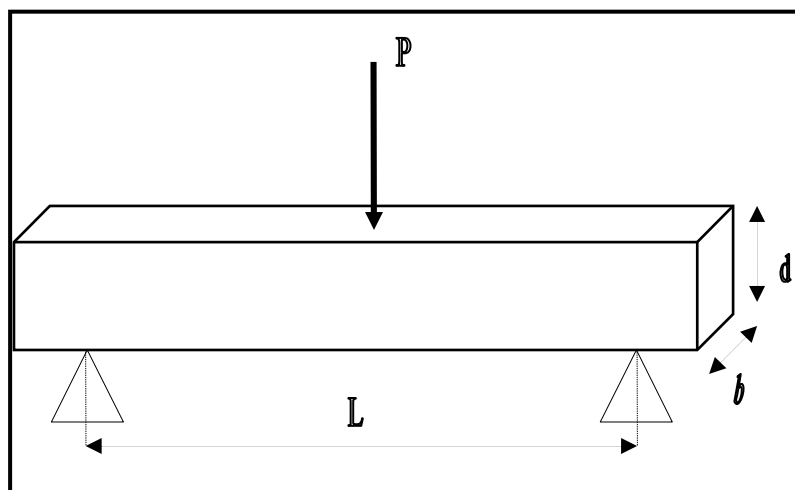
Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε στα πρισματικά δοκίμια. Το πρότυπο που χρησιμοποιεί η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (Σχήμα 4.3) είναι το ASTM C348.



Σχήμα 4.3 Διάταξη για έλεγχο αντοχής σε κάμψη.

Η τιμή της τάσης στα εξωτερικά όρια του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (Σχήμα 4.4), υπολογίζεται για το μέσο του μήκους του από την σχέση:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$$



Σχήμα 4.4 Σχηματικό διάγραμμα της διάταξη φόρτισης για τη δοκιμή της σε κάμψης τριών σημείων.

όπου: σ_f η τιμή της τάσης στα εξωτερικά όρια του υπό κάμψη ραβδόμορφου

δοκιμίου (MPa),

P, το φορτίο αστοχίας του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (MPa),

L, το έκταμα έδρασης του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (mm),

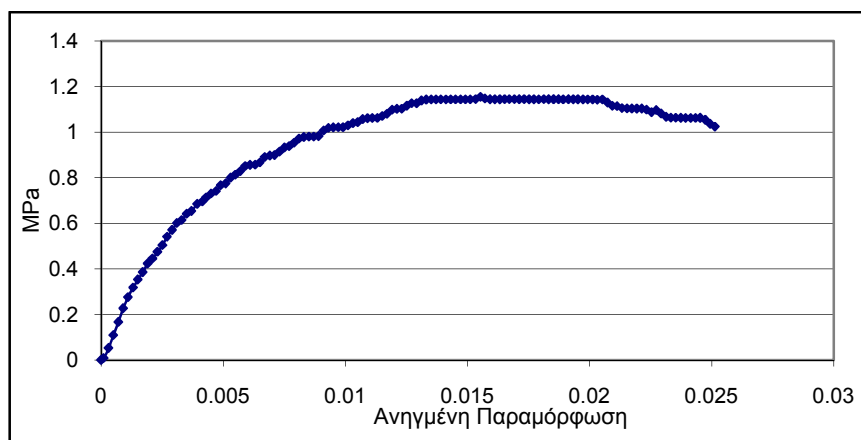
b, το πλάτος του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (mm), και

d, το ύψος του υπό κάμψη ραβδόμορφου δοκιμίου (mm)

Η τιμή της αντοχής σε κάμψη αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον προσδιορισμό της πιθανής εμπορικής χρήσης της εκάστοτε σύνθεσης.

Προσδιορισμός μέτρου ελαστικότητας (Μέτρο Young)

Επίσης στις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, λήφθηκε υπόψιν και το μέτρο ελαστικότητας Young. Αν για ένα υλικό γίνει η γραφική παράσταση της τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης θα παρατηρηθεί μια καμπύλη της παρακάτω μορφής (Σχήμα 4.5)



Σχήμα 4.5 Γράφημα τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης.

Το μέτρο ελαστικότητας Young, μπορεί να υπολογισθεί από την κλίση της ευθείας **0Α**, όπου η ευθεία αυτή αντιστοιχεί και στην ελαστική περιοχή ενός δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας βοηθά την τεχνολογία των κατασκευών, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά των υλικών κάτω από διάφορες καταπονήσεις. Κανένα υλικό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται εκτός της ελαστικής

του περιοχής. Υλικά με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν πρόκειται να δεχθούν κάμψεις.

Μέτρηση πυκνότητας και υδατοαπορροφησης

Ακολούθησε ο προσδιορισμός της πυκνότητας αντιπροσωπευτικών δοκιμίων της κάθε σύνθεσης που χρησιμοποιήθηκε. Χρησιμοποιώντας ογκομετρικό σωλήνα, όπου περιέχει απιονισμένο νερό, υπολογίζεται ο όγκος του δοκιμίου. Γνωρίζοντας τον όγκο του δοκιμίου και το βάρος του, μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα του.

Σημαντικός για όλες τις κατασκευαστικές εφαρμογές παρουσιάζεται επίσης ο προσδιορισμός της υδατοαπορροφησης των δοκιμίων, δηλαδή η ικανότητα που έχει κάθε δοκίμιο να απορροφά νερό. Αρχικά αντιπροσωπευτικά δοκίμια κάθε σύνθεσης τοποθετήθηκαν για δύο ημέρες σε φούρνο σε θερμοκρασία 60°C. Στη συνέχεια μετρήθηκε το βάρος τους και τοποθετήθηκαν σε νερό, όπου και παρέμειναν για δύο ημέρες. Μετά το πέρας των δύο αυτών ημερών τα δοκίμια σκουπίστηκαν από σταγόνες νερού στην εξωτερική τους επιφάνεια και μετρήθηκε ξανά το βάρος τους.

Ο λόγος μεταξύ του βάρους του απορροφούμενου νερού προς το βάρος του σώματος σε ξηρή κατάσταση προσδιορίζει την υδατοαπορροφητικότητα τους. Ο τύπος με τον οποίο υπολογίζεται η υδατοαπορροφητικότητα δίνεται παρακάτω:

$$E = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100$$

όπου, m_2 το βάρος του σώματος με το απορροφημένο νερό και m_1 το δοκίμιο σε ξηρή κατάσταση μετά την παραμονή του εντός του φούρνου.

Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων

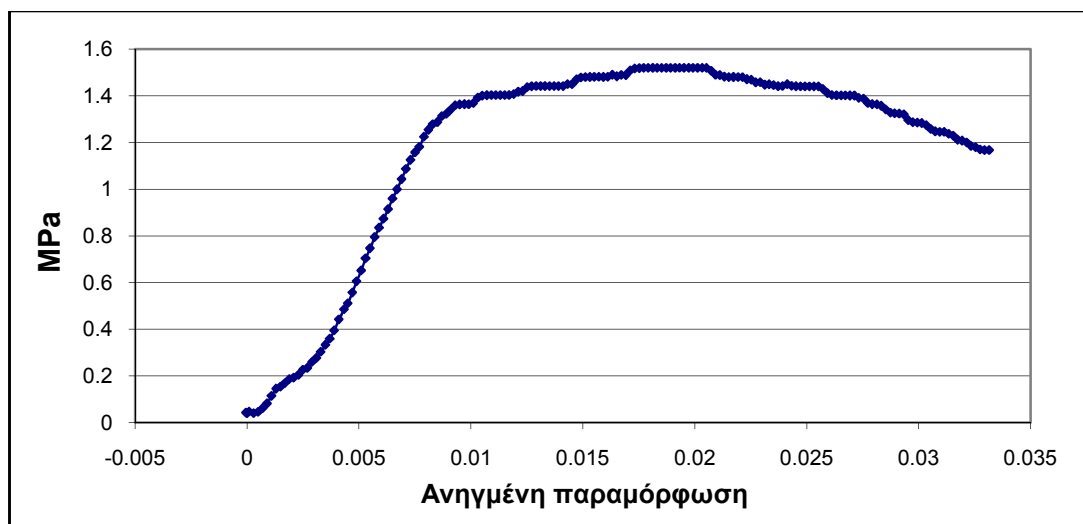
Στο Πίνακα 4.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα όλων των εργαστηριακών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα δοκίμια των συνθέσεων του SCμC.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων δοκιμίων των συνθέσεων SCμC

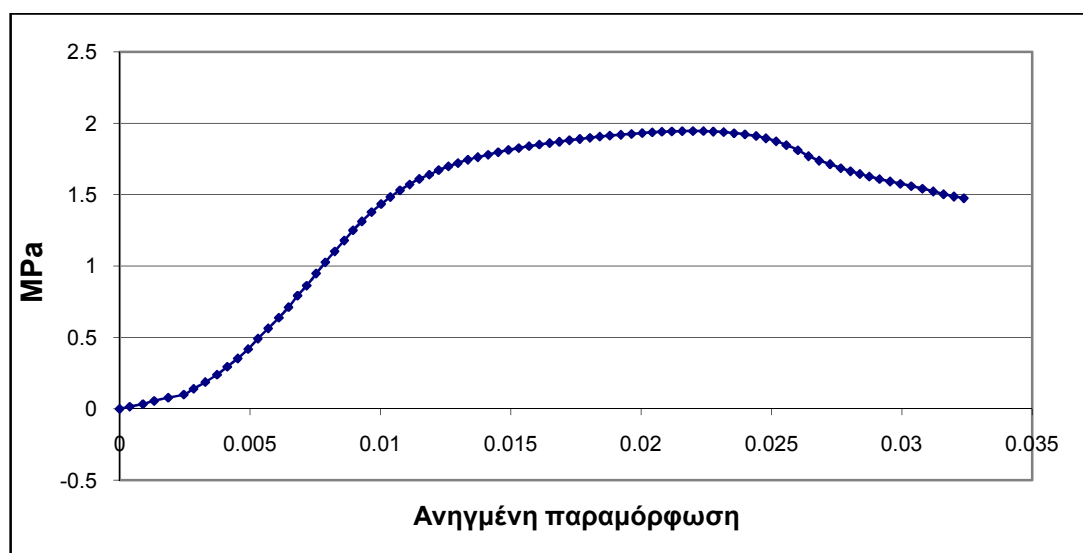
Κωδικός Σύνθεσης	Αριθμός δοκιμίων		Λόγος Νερό/ Τσιμ.	Μέση αντοχή σε μονοαξον. Θλίψη (MPa)	Μέτρο Young (MPa)	Μέση αντοχή σε κάμψη (MPa)	Υδατ.%	Πυκνότη. g/cm ³
	Κυβικά	Πρισματικά						
A	6	4	3,9	1,38	230	0,7	24,08	1,45
B	3	3	4,17	1,05	260	0,57	*	
Γ	2	3	5,11	0,61	200	0,39	*	
Δ	3	2	5,55	0,53	175	0,24	*	
Γ ₂	7	3	3,1	1,72	137.5	0,64	23,7	1,51
Δ ₂	3	3	2,6	2,33	93	1,21	21,7	1,65
A ₂	4	2	1,17	11,66	445	3,24	17,3	1,71

*Στα δοκίμια των συνθέσεων Β-Γ-Δ δεν πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της υδατοαπορροφητικότητας τους. Λόγω της πολύ χαμηλής συνεκτικότητας και του σε μεγάλο βαθμό εγκλωβισμένου αέρα που παρουσίασαν τα δοκίμια αυτών των συνθέσεων, διαλύθηκαν κατά την διήμερη παραμονή τους εντός του νερού.

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο διαγράμματα (Σχήμα 4.6-4.7), όπου παρουσιάζεται η τάση που εφαρμόστηκε σε αντιπροσωπευτικά δοκίμια των συνθέσεων Α και Α₂ συναρτήσει της μετατόπισης, όπου από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της γραφικής παράστασης έγινε και ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας Young. Στο Παράρτημα Β παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις τάσης-μετατόπισης για δοκίμια της κάθε σύνθεσης.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για δοκίμιο της σύνθεσης Α.

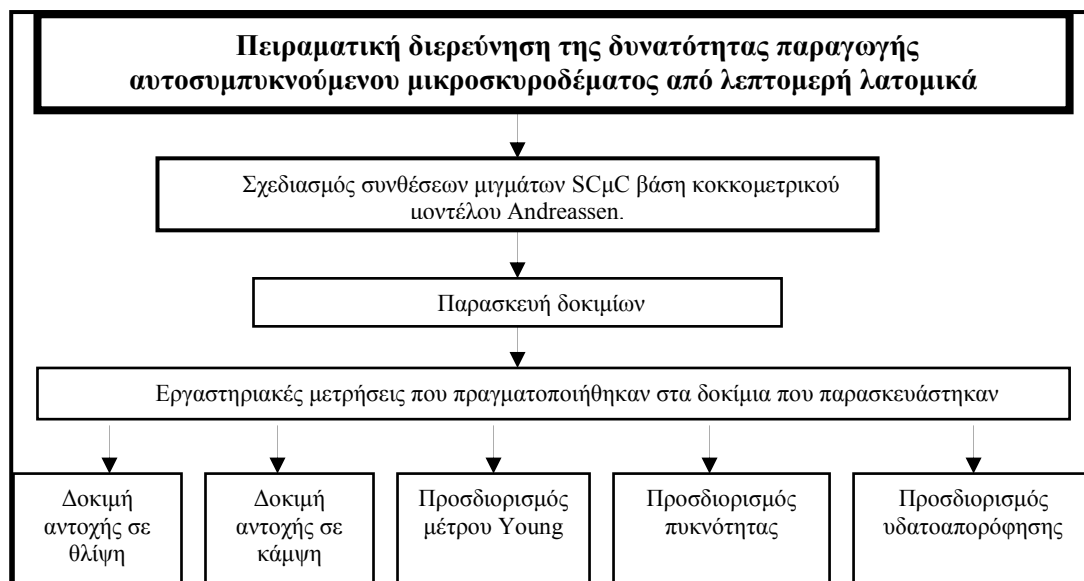


Σχήμα 4.7 Διάγραμμα τάσης-μετατόπισης για δοκίμιο της σύνθεσης Α₂.

Κεφάλαιο 5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος χρησιμοποιώντας μόνο ως πρώτη ύλη ασβεστολιθική παιπάλη, παρατίθεται στο Σχήμα 5.1. Βάσει των αποτελεσμάτων από την διερεύνηση αυτή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση βασικών παραμέτρων των συνθέσεων του SCμC με τις φυσικομηχανικές αντοχές των δοκιμών που προέκυψαν παράμετροι αυτοί είναι:

- Λόγος νερού/τσιμέντου (N/T).
- Λόγος τσιμέντου/αδρανών (T/A).
- Περιεκτικότητα μιγμάτων σε χημικά πρόσμικτα σκυροδέματος.



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα ροής πειραματικής διερεύνησης.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι Πίνακες 5.1-5.2, όπου περιέχονται αναλυτικά οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση με τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των δοκιμών των συνθέσεων του SCμC.

Πίνακας 5.1 Συνοπτικός Πίνακας Εργαστηριακής μελέτης δοκιμίων Α-Β-Γ-Δ-Α₂-Γ₂-Δ₂

Κωδικός σύνθεσης	Παράμετροι Ελέγχου						Παράμετροι Απόκρισης						
	Λόγος Έγχρωμης/ Λευκής Παιπάλης	Λόγος Τσιμέντο/ Παιπάλη	Νερό/ Τσιμέντο	Υπερρευστ. gr/100kg στερεών	Πλαστικ. gr/100kg στερεών	Ανάμιξη Κανονική ή Βίαη	Κώνος εξάπλ. (cm)	Αντοχή σε θλίψη (Μpa)		Αντοχή σε κάμψη (Μpa)		Υδατ. %	Πυκνότη. g/cm ³
								Μέση τιμή (Μpa)	Αρ. Δοκιμ .	Μέση τιμή (Μpa)	Αρ. Δοκ.		
A	1,29	0,075	3,9	1,59	0,19	Κανονική	13	1,38	6	0,7	4	24,08	1,45
B	1,29	0,075	4,17	1,59	0,095	Κανονική	13	1,05	3	0,57	3		
Γ	1,29	0,075	5,11	0,795	0,19	Κανονική	13	0,61	2	0,39	3		
Δ	1,29	0,075	5,55	0,795	0,095	Κανονική	13	0,53	3	0,24	2		
A ₂	0,9	0,24	1,17	1,59	0,19	Κανονική		11,66	4	3,24	2	17,3	1,71
Γ ₂	2,3	0,1	3,1	1,59	0,19	Κανονική	9,5	1,72	4	0,64	3	23,7	1,51
Δ ₂	2,3	0,1	2,6	1,59	0,19	Κανονική	8,8	2,33	3	1,21	3	21,7	1,65

Πίνακας 5.2 Συνοπτικός Πίνακας Εργαστηριακής μελέτης δοκιμίων K₁-K₂-K₃

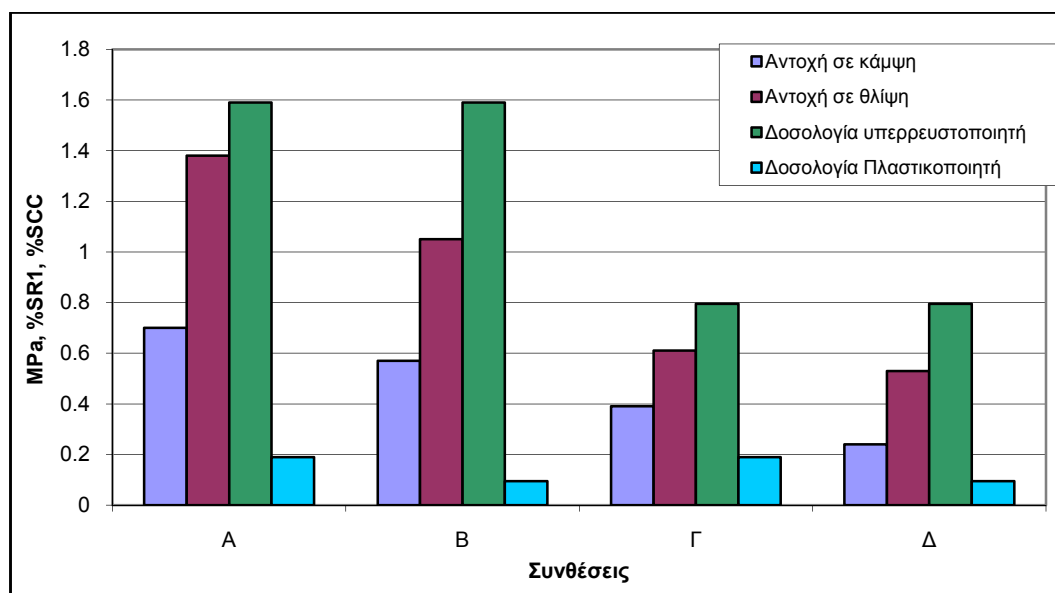
Κωδικός σύνθεσης	Παράμετροι Ελέγχου						Παράμετροι Απόκρισης						
	Λόγος Έγχρωμης/Λευκής Παιπάλης	Λόγος Τσιμέντο/ Παιπάλη	Νερό/ Τσιμέντο	Υπερρευστ. gr/100kg στερεών	Πλαστικ. gr/100kg στερεών	Ανάμιξη Κανονική ή Βίαη	Κώνος εξάπλ. (cm)	Αντοχή σε θλίψη (Μpa)		Αντοχή σε κάμψη (Μpa)		Υδατ. %	Πυκνότη. g/cm ³
								Μέση τιμή (Μpa)	Αρ. Δοκιμ .	Μέση τιμή (Μpa)	Αρ. Δοκ.		
K ₁	Μόνο Έγχρωμη παιπάλη	0,15	1,93	1,59	0,19	Βίαη		14,17		3,3		17,36	2,6
K ₂	Μόνο Λευκή παιπάλη	0,3	1,09	1,59	0,19	Βίαη		26,02		8,95		15,93	2,6
K ₃	Μόνο Έγχρωμη παιπάλη	0,3	1,27	1,59	0,19	Βίαη		19,87		5,7		16,83	1,9

Παρατηρείται πως υπάρχει μια αρκετά μεγάλη απόκλιση στα αποτελέσματα όσον αφορά τις αντοχές των δοκιμών του Πίνακα 5.1 και του Πίνακα 5.2. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στους λόγους νερό/τσιμέντο των μιγμάτων. Αυτό γιατί τα μίγματα του Πίνακα 5.1 προορίζονταν για αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, δηλαδή ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και αυξημένη ρεολογική ικανότητα, ενώ τα μίγματα του Πίνακα 5.2 προορίζονταν για παραγωγή μικροσκυροδέματος (χυτεύσιμου), δηλαδή υψηλές μηχανικές αντοχές και μικρή ρεολογική ικανότητα.

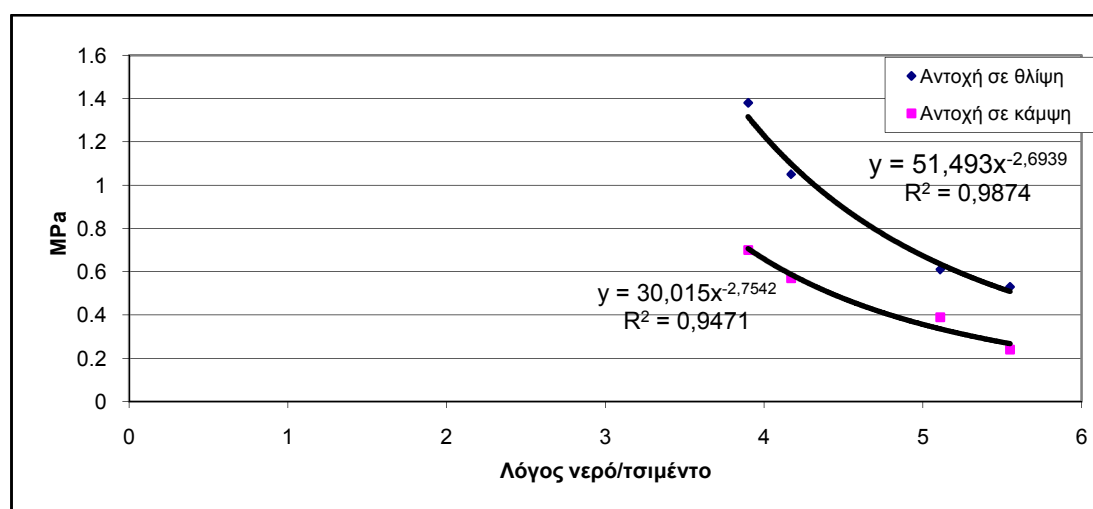
Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί, πως τα δοκίμια του Πίνακα 5.1 παρασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας διαφορετική μέθοδο ανάμιξης σε σχέση με τα δοκίμια του Πίνακα 5.2. Στα δοκίμια των A-B-Γ-Δ-A₂-Γ₂-Δ₂ συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε κανονική (βραδεία) ανάμιξη, ενώ στα δοκίμια των K₁-K₂-K₃ συνθέσεων χρησιμοποιήθηκε βίαιη (ταχεία) ανάμιξη.

Παρατηρείται ακόμη πως οι αντοχές σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη των δοκιμών των συνθέσεων A-B-Γ-Δ παρουσιάζουν εμφανείς διαφορές μεταξύ τους, παρόλο που και στις τέσσερις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια κοκκομετρική σύνθεση βάση του κοκκομετρικού μοντέλου Andreassen. Η διαφορά αυτή στις φυσικομηχανικές αντοχές των συνθέσεων αυτών οφείλεται στις διαφορετικές συνιστώμενες δοσολογίες ειδικών χημικών πρόσμικτων σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν στη κάθε περίπτωση. Η διαφορετική δοσολογία σε υπερρευστοποιητή και πλαστικοποιητή είχε ως αποτέλεσμα να χρειαστεί στο κάθε μίγμα να προστεθεί διαφορετική ποσότητα νερού για να επιτευχθεί κώνος εξάπλωσης 13cm. Με αυτόν τον τρόπο έγινε κατανοητό πως τα ποσοστά συμμετοχής των πρόσμικτων σκυροδέματος δεν επηρεάζουν μόνον την ιξώδη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας, κατά την φάση της επεξεργασίας, αλλά και την τελική αντοχή του ώριμου προϊόντος. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του λόγου νερού/τσιμέντου μέσω της χρήσης του υπερρευστοποιητή, γεγονός ευρέως γνωστό από την τεχνολογία σκυροδέματος, αλλά και στην χειρότερη ομογενοποίηση και ισότροπη συμπεριφορά της πλαστικής μάζας που επιφέρει η μείωση της δοσολογίας σε πλαστικοποιητή.

Παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα, όπου παρουσιάζουν την επίδραση της δοσολογίας υπερρευστοποιητή και πλαστικοποιητή, καθώς και του λόγου νερού/τσιμέντου στις μηχανικές αντοχές των δοκιμών των συνθέσεων Α-Β-Γ-Δ (Σχήμα 5.2-5.3).



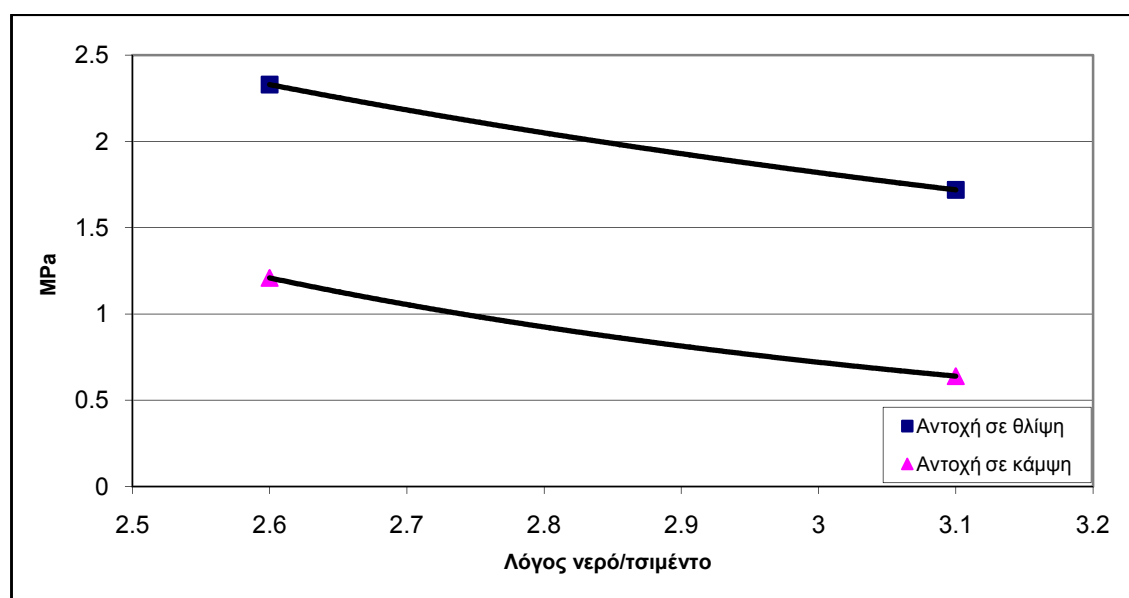
Σχήμα 5.2 Επίδραση χημικών πρόσμικτων στις μηχανικές αντοχές (SR1-υπερρευστοποιητής, SCC-πλαστικοποιητής).



Σχήμα 5.3 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο N/T.

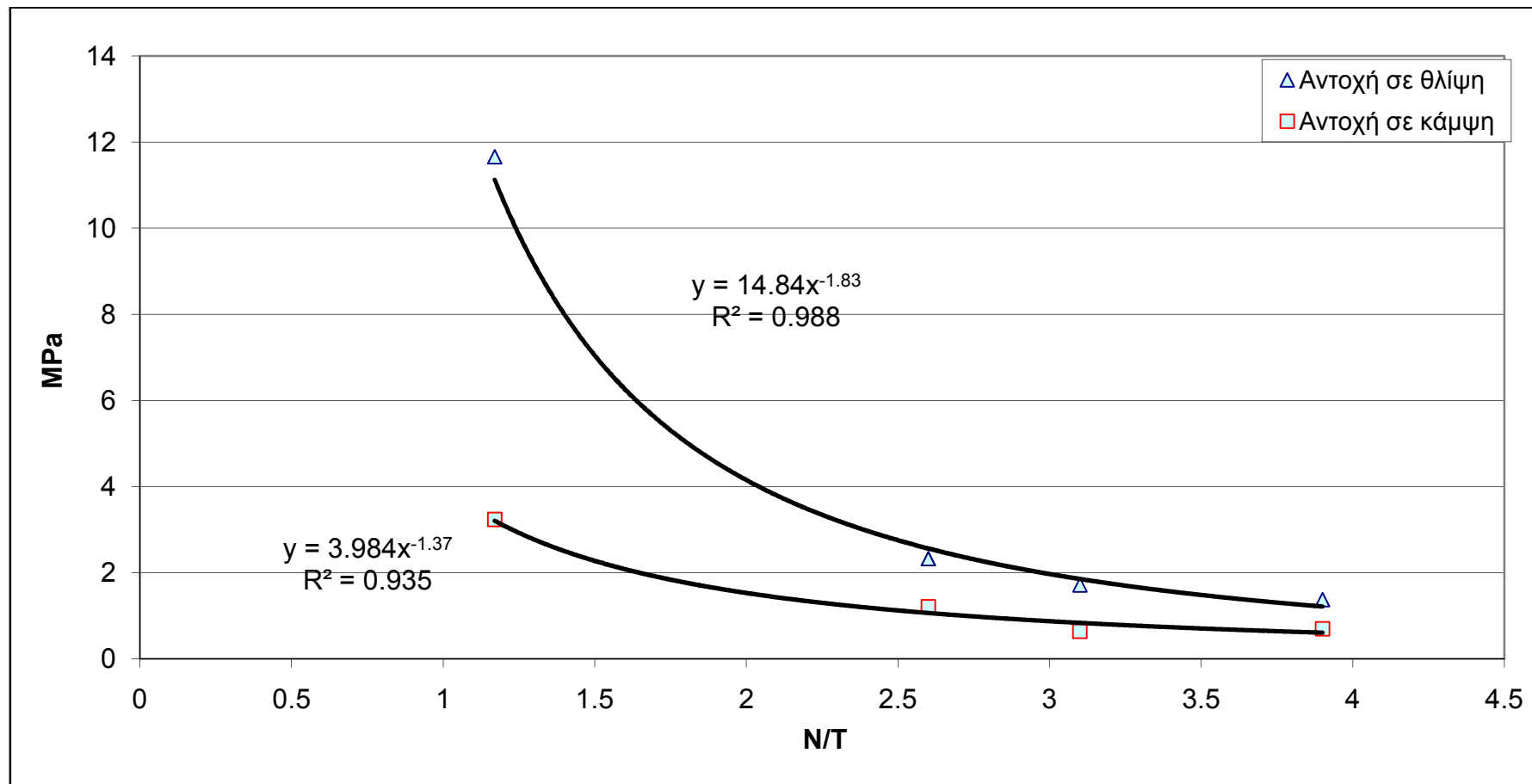
Ακόμη παρατηρείται πως τα δοκίμια της σύνθεσης Δ₂ εμφάνισαν σχεδόν διπλάσιες τιμές σε αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και κάμψη σε σχέση με τα δοκίμια της

σύνθεσης Γ_2 , παρόλο που και τα δύο μίγματα παρήχθησαν βάση της ίδιας κοκκομετρικής σύνθεσης. Αυτό λόγω ότι ορίστηκε διαφορετικός κώνος εξάπλωσης για τις δύο συνθέσεις, όπως έχει αναφερθεί ήδη, με αποτέλεσμα να χρειαστεί διαφορετική ποσότητα νερού να εισαχθεί στο μίγμα για να επιτευχθεί το επιθυμητό μέτρο εξάπλωσης με δεδομένο πως η αλλαγή του ποσοστού του νερού έχει άμεσο αντίκτυπο στις τελικές αντοχές του αναμίγματος, λόγω αύξησης του λόγου νερού/τσιμέντου. Παρακάτω παρατίθεται διάγραμμα, όπου παρουσιάζει τη μεταβολή των μηχανικών αντοχών των δοκιμίων των Γ_2 και Δ_2 συνθέσεων λόγω μεταβολής του λόγου νερού/τσιμέντου (Σχήμα 5.4).

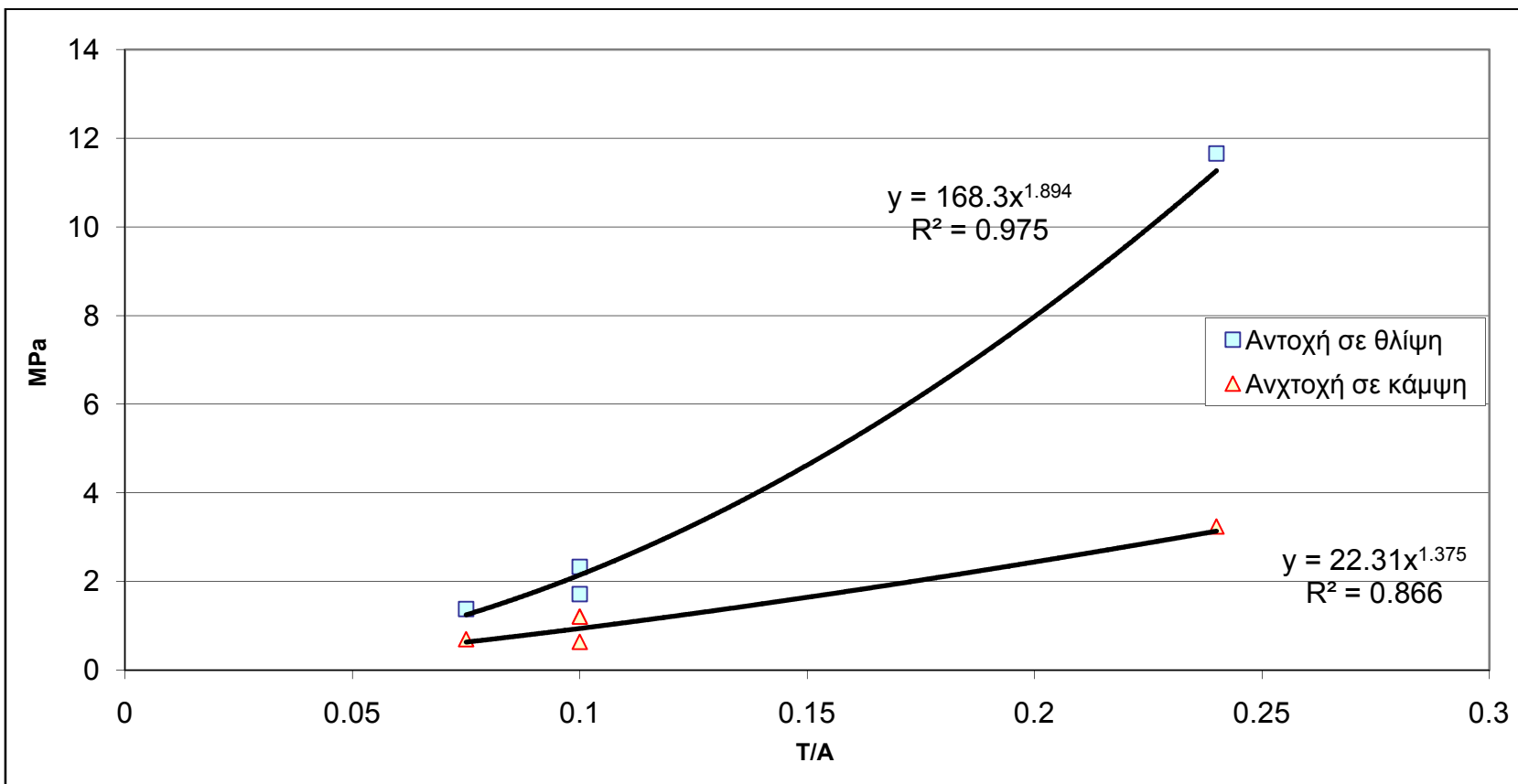


Σχήμα 5.4 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο N/T.

Επίσης παρακάτω παρατίθενται δύο διαγράμματα (Σχήματα 5.5-5.6), όπου παρουσιάζουν τις μηχανικές αντοχές των δοκιμίων των συνθέσεων A-A₂- Γ_2 - Δ_2 του SCμC, όπου χρησιμοποιήθηκαν και για τις τέσσερις συνθέσεις οι μέγιστες συνιστώμενες δοσολογίες υπερρευστοποιητή και πλαστικοποιητή, συναρτήσει των λόγων N/T και T/A.

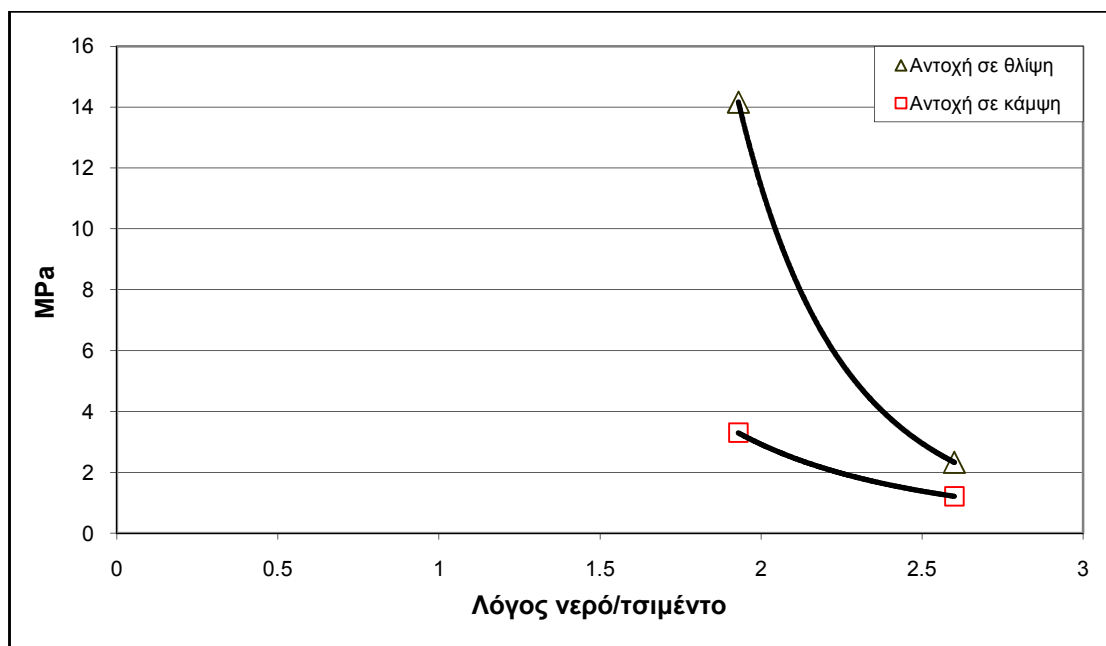


Σχήμα 5.5 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο N/T.

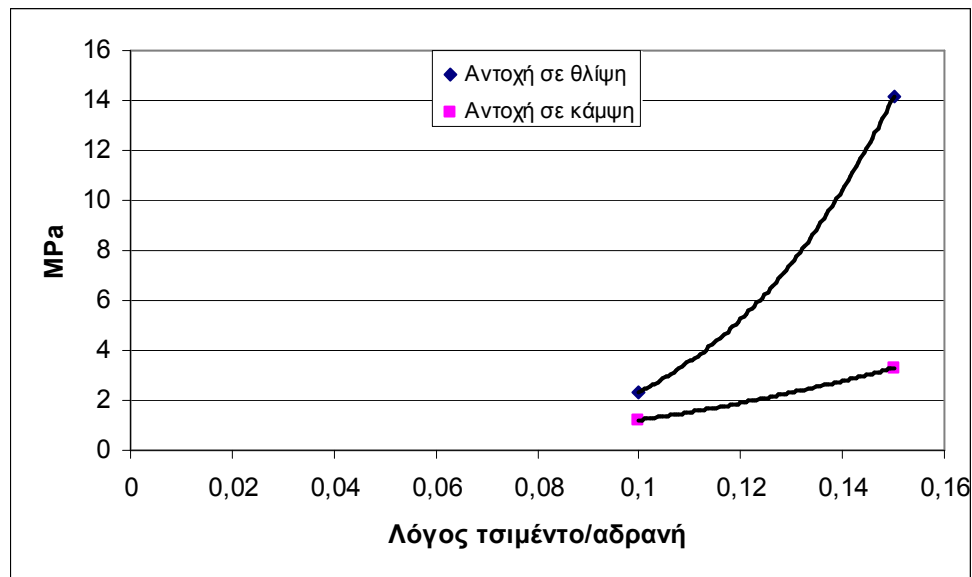


Σχήμα 5.6 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο T/A.

Ακόμη διαφορά της τάξεως των 10MPa σε μονοαξονική θλίψη και 2MPa σε αντοχή σε κάμψη, παρατηρείται στα δοκίμια της σύνθεσης Δ_2 και των δοκιμίων μικροσκυροδέματος της σύνθεσης K_1 . Η διαφορά αυτή δεν μπορεί να αποδοθεί εξ ολοκλήρου στη διαφορά σε περιεκτικότητα σε τσιμέντο που παρουσιάζουν οι δύο αυτές συνθέσεις. Σημαντικό εξίσου ρόλο διαδραμάτισε η διαφορά του λόγου νερό/τσιμέντο ανάμεσα στα δύο μίγματα των συνθέσεων Δ_2 και K_1 , όπου ο λόγος της πρώτης ήταν κατά 26% μεγαλύτερος από της δεύτερης. Στα σχήματα 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται αυτές οι συσχετίσεις.



Σχήμα 5.7 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο N/T.



Σχήμα 5.8 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο T/A.

Σημαντικές διαφορές παρουσιάζονται και στις μηχανικές αντοχές των δοκιμών της σύνθεσης A₂ σε σύγκριση με τις μηχανικές αντοχές των δοκιμών των συνθέσεων μικροσκυροδέματος K₂ και K₃. Διαφορές της τάξης των 8 έως και 14MPa, όπως παρατηρήθηκαν, δεν μπορούν να δικαιολογηθούν εξ ολοκλήρου μόνο λόγο των διαφορών των τριών μιγμάτων στους λόγους τσιμέντο/αδρανή και νερό/τσιμέντο. Οι παράγοντες που συνετέλεσαν στην ύπαρξη αυτών των διαφορών στις μηχανικές αντοχές των τριών παραπάνω μιγμάτων, αλλά και στις διαφορές των δοκιμών των συνθέσεων Δ₂ και K₁, είναι οι εξής:

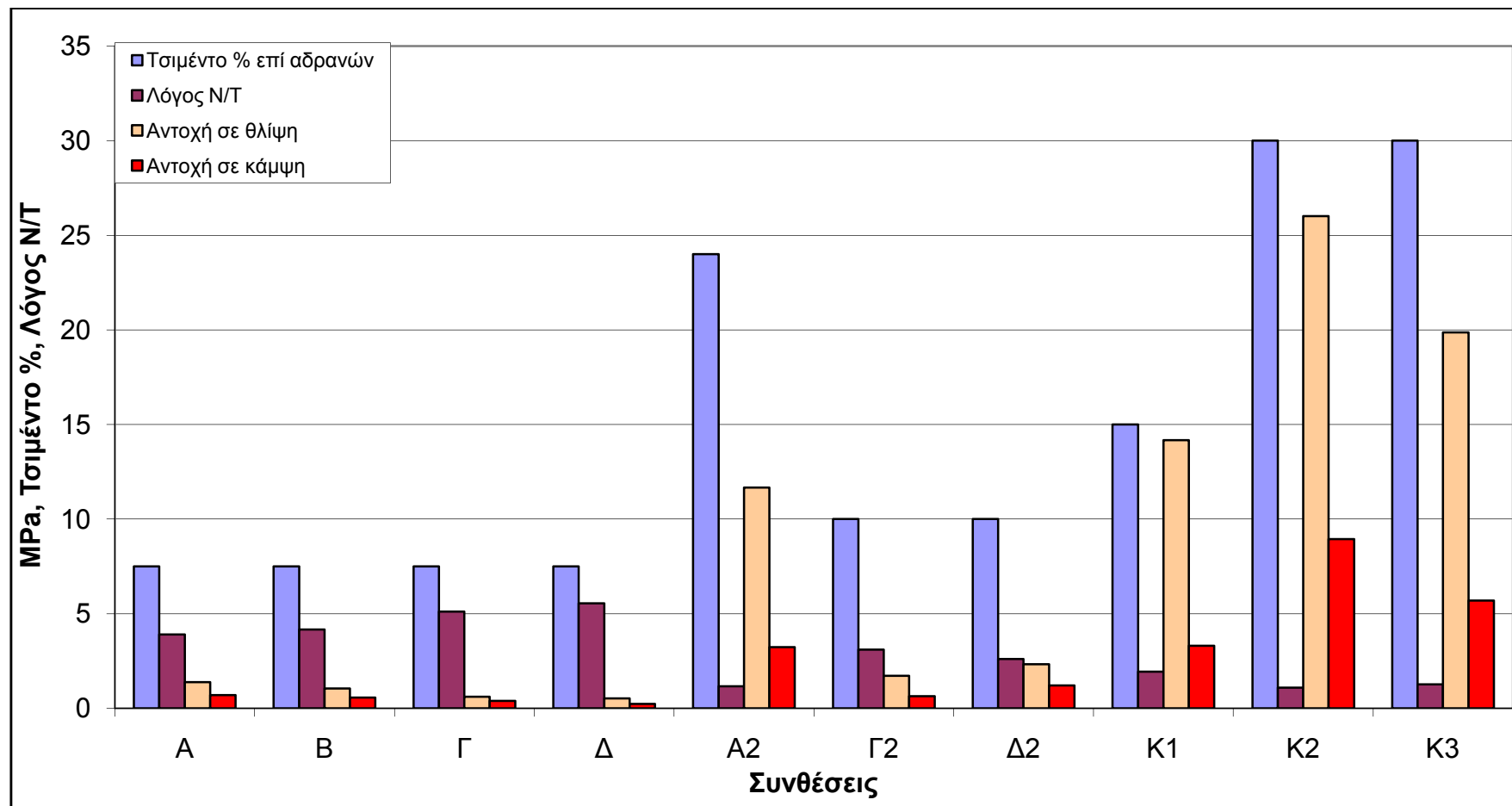
- Τα μίγματα των κοκκομετρικό συνθέσεων A-B-Γ-Δ-A₂-Γ₂-Δ₂ παρασκευάστηκαν για την διερεύνηση της δυνατότητας παραγωγής δύο τύπων αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος (SCμC). Με γνώμονα αυτό, οι τιμές της παραμέτρου q για το κοκκομετρικό μοντέλο Andreassen, είχαν οριστεί από 0,25 έως 0,30. Αντίθετα τα μίγματα των συνθέσεων K₁-K₂-K₃ παρασκευάστηκαν με γνώμονα την παραγωγή ενός χυτεύσιμου μικροσκυροδέματος με υψηλές μηχανικές αντοχές και για αυτό το λόγο η παράμετρος q για αυτές ορίστηκε στα 0,36. Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3), η

παράμετρος q , αποτελεί μία από τις βασικότερες παραμέτρους του μοντέλου Andreassen για τον σχεδιασμό της βέλτιστης κοκκομετρικής διαβάθμισης μιας σύνθεσης ενός μίγματος. Δεδομένου αυτού, αν οι συνθέσεις του SCμC είχαν σχεδιαστεί με τιμή $q=0,36$, οι συστάσεις λευκή και έγχρωμη παιπάλη θα ήταν διαφορετικές και οι μηχανικές αντοχές των νέων αυτών μιγμάτων θεωρητικά υψηλότερες, όσον αφορά τη κοκκομετρική διαβάθμιση των μιγμάτων αυτών.

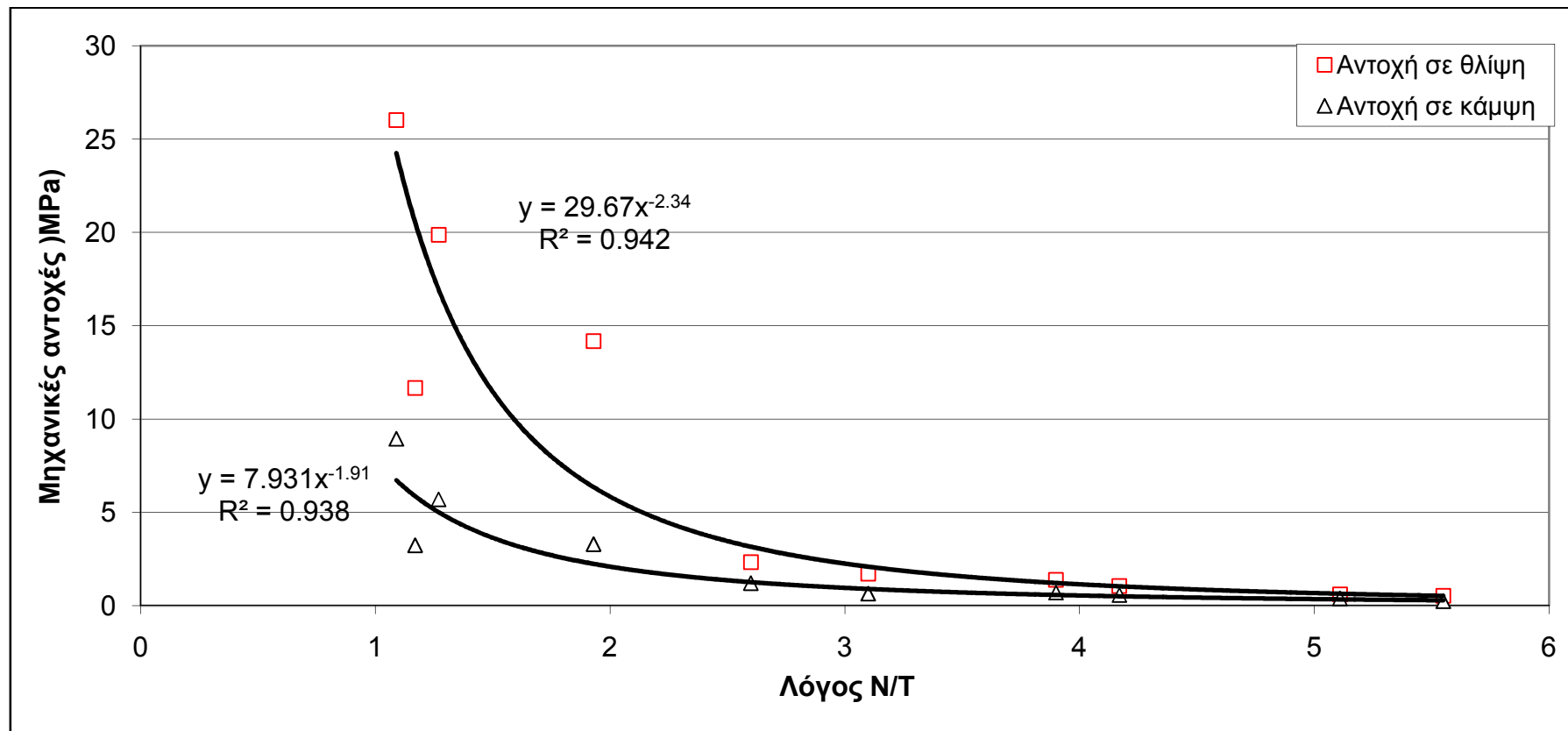
- Επιπροσθέτως η διαφορετική κοκκομετρική διαβάθμιση που είχαν τα μίγματα του SCμC από τα μίγματα μικροσκυροδέματος, δεν οφειλόταν μόνο στην διαφορετική τιμή της παραμέτρου q στο κοκκομετρικό μοντέλο Andreassen. Τα μίγματα SCμC αποτελούνταν από λευκή και έγχρωμη παιπάλη από αδρανή, ενώ στα μίγματα μικροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε μόνο λευκή παιπάλη στα δύο και μόνο έγχρωμη στο τρίτο.
- Όπως έχει αναφερθεί ήδη, τα μίγματα του SCμC παρασκευάστηκαν με κανονική ανάμιξη, ενώ στα μίγματα μικροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε βίαιη ανάμιξη. Είναι γνωστό πως με τη βίαιη ανάμιξη επιτυγχάνεται καλύτερη αποσυσσωμάτωση και διασπορά των κόκκων του τσιμέντου εντός του αδρανούς υλικού σε σύγκριση με την κανονική, χωρίς όμως να υπάρχει ένα εργαστηριακά αποδεδειγμένο μέτρο σύγκρισης για αυτό. Μπορεί, λοιπόν, η επιλογή ανάμιξης να θεωρηθεί ως παράγοντας που διετέλεσε στην ύπαρξη των διαφορών στις μηχανικές αντοχές των δοκιμίων του SCμC και του χυτεύσιμου μικροσκυροδέματος, χωρίς να γνωρίζεται όμως ο βαθμός επιρροής αυτού του παράγοντα.

Ο καθοριστικός ρόλος που διαδραμάτισαν οι παραπάνω παράγοντες, διαφαίνεται από το γεγονός πως τα μίγματα της σύνθεσης A_2 του SCμC παρουσίασαν παραπλήσιες ιδιότητες με αυτές του μικροσκυροδέματος της σύνθεσης K_1 , παρόλο που τα μίγματα των δύο παρασκευάστηκαν βάση διαφορετικών παραμέτρων.

Στη συνέχεια παρατίθενται δύο διαγράμματα, όπου παρουσιάζουν τις βασικές παραμέτρους των συνθέσεων ως προς τις μηχανικές αντοχές των δοκιμίων του SCμC και του μικροσκυροδέματος (Σχήματα 5.9-5.10).



Σχήμα 5.9 Βασικές παράμετροι των συνθέσεων αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος (A-B-Γ-Δ-A₂-Γ₂-Δ₂) και χυτεύσιμου μικροσκυροδέματος (K₁-K₂-K₃) συναρτήσεως μηχανικών αντοχών που παρουσίασαν.



Σχήμα 5.10 Μεταβολή της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και σε κάμψη σε σχέση με το λόγο N/T.

Γενικότερα τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων των δοκιμίων του SCμC ήταν μειωμένα σε σχέση με τα αναμενόμενα, καθώς επίσης παρουσίασαν πολύ μικρότερες μηχανικές αντοχές από τα κοινά σκυροδέματα και τα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα (SCC, self compacting concrete). Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όμως ένα μέτρο σύγκρισης για τα τρία αυτά είδη σκυροδέματος λόγω του ότι παρασκευάζονται βάσει εντελώς διαφορετικών παραμέτρων, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ο λόγος νερό/τσιμέντο των μιγμάτων SCμC κυμάνθηκε από 1,20 έως 5,5, ενώ ο λόγος νερό/τσιμέντο σύμφωνα με τα πρότυπα του ελληνικού κανονισμού σκυροδέματος για το κοινό σκυρόδεμα και το αυτοσυμπυκνούμενο κυμαίνεται στο 0,3 έως 0,4 για το πρώτο και 0,6 έως 0,7 για το δεύτερο αντίστοιχα. Γνωρίζοντας πως μία μικρή μεταβολή του λόγου αυτού μπορεί να επιφέρει μεγάλες αλλαγές στις φυσικομηχανικές ιδιότητες ενός σκυροδέματος, μπορούν να αιτιολογηθούν και οι ανομοιοότητες που παρουσιάζουν τα τρία αυτά είδη σκυροδέματος.
- Επίσης για την παρασκευή των δύο τύπων SCμC χρησιμοποιήθηκε ως αδρανές ασβεστολιθική παιπάλη, που χαρακτηρίζεται ως υπέρλεπτο υλικό, σε αντίθεση με τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του κοινού σκυροδέματος και του SCC που είναι αρκετά πιο χονδρόκοκκα. Η χρήση υπέρλεπτου υλικού αντί χονδρόκοκκου υλικού, συνδέεται άμεσα και με την αυξημένη ύπαρξη εγκλωβισμένου αέρα εντός των δοκιμίων, γεγονός που καθίσταται αρνητικός παράγοντας στις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος.

Κεφάλαιο 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Συμπεράσματα

Η αξιοποίηση της παιπάλης που παράγεται από τα λατομεία αδρανών υλικών μπορεί να επιλύσει τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργούνται από τη συσσώρευση της, καθώς επίσης να επιφέρει οικονομικά οφέλη.

Η εξέταση της δυνατότητας αξιοποίησης της ασβεστολιθικής παιπάλης, πραγματοποιήθηκε μέσω της σχεδίασης και παρασκευής δύο τύπων μιγμάτων αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος (SCμC), το πρώτο με μικρό ποσοστό σε τσιμέντο και το δεύτερο με υψηλότερο. Η χρήση του κοκκομετρικού μοντέλου Andreassen μέσω του λογισμικού LISA-TM, βοήθησε στην ασφαλέστερη εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων για τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των δοκιμών των παραπάνω μιγμάτων, μέσω της επίτευξης της βέλτιστης κοκκομετρικής σύνθεσης των αδρανών που λάμβαναν μέρος σε αυτά.

Κατά τη σχεδίαση των κοκκομετρικών συνθέσεων των μιγμάτων SCμC, παρατηρήθηκαν αποκλίσεις των κοκκομετρικών καμπυλών των παραπάνω από την πρότυπη καμπύλη της τροποποιημένης εξίσωσης του Andreassen που χρησιμοποιήθηκε. Η απόκλιση αυτή λειτούργησε ως αρνητικός παράγοντας στην επίτευξη της βέλτιστης κοκκομετρικής σύνθεσης, η οποία θα βοηθούσε στην επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων σε μεγαλύτερο βαθμό.

Η πρώτη πειραματική διερεύνηση αφορούσε τη παρασκευή SCμC με χαμηλό ποσοστό τσιμέντου για χρήση του ως πληρωτικό υλικό, με στόχο την αξιοποίηση της παιπάλης μέσω μιας πολύ οικονομικά συμφέρουσας λύσης. Η εργαστηριακή μελέτη των δοκιμών των συνθέσεων για τη διερεύνηση αυτή, δηλαδή τις συνθέσεις A-B-Γ-Δ-Γ₂-Δ₂, απέδειξε πως μόνο τα παρασκευάσματα των συνθέσεων A-Γ₂-Δ₂ πληρούν τις προϋποθέσεις και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πληρωτικά υλικά. Αντίθετα τα παρασκευάσματα των συνθέσεων B-Γ-Δ, που παρασκευάστηκαν με την ίδια κοκκομετρική σύνθεση με την A αλλά χρησιμοποιώντας διαφορετική δοσολογία χημικών ειδικών πρόσμικτων σκυροδέματος, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από

τον κατασκευαστικό κλάδο, λόγω της πολύ χαμηλής αντοχής σε θλίψη και κάμψη που παρουσίασαν.

Η δεύτερη πειραματική διερεύνηση αφορούσε τη παρασκευή SCμC με υψηλό ποσοστό τσιμέντου και τη χρήση του ως υλικό υποστρωμάτων δαπέδων. Για το σκοπό αυτό παρασκευάστηκαν τα δοκίμια της σύνθεσης A₂. Η εργαστηριακή μελέτη των δοκιμίων της σύνθεσης αυτής, απέδειξε πως πληρούν τις προδιαγραφές για χρήση τους υλικά υποστρωμάτων δαπέδων. Λόγω όμως της όχι ιδιαίτερα υψηλής ρεολογικής ικανότητας του νωπού σκυροδέματος της σύνθεσης αυτή, κρίνεται απαραίτητη η χρήση δόνησης για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η εξάπλωση του υλικού, λόγω μη ικανότητας αυτοεπιπέδωσης.

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθεί, πως παράγοντες όπως η παρουσία ξένων υλικών σε αυξημένες συγκεντρώσεις εντός των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν και η παρουσία εγκλωβισμένου αέρα εντός των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν, λειτούργησαν αρνητικά στις φυσικομηχανικές ιδιότητες των παραπάνω δοκιμίων. Αρνητικό ρόλο διαδραμάτισε και η μορφολογία των κόκκων των αδρανών υλικών που συμμετείχαν στις συνθέσεις, λόγω του ακανόνιστου γωνιώδη σχήματος που τους χαρακτήριζε.

6.2 Προτάσεις

Για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων που παρουσιάστηκαν μπορούν να προταθούν τα εξής:

- Αρχικά όσον αφορά την απόκλιση των καμπυλών των συνθέσεων από την πρότυπη καμπύλη της τροποποιημένης εξίσωσης του Andreassen, να προστεθούν υπερλεπτομερή πυριτικά όπως microsilica. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αλλά σημαντική μείωση της απόκλισης και συνάμα την επίτευξη της βέλτιστης κοκκομετρικής διαβάθμισης ανάλογα με την ιδιότητα που επιθυμείται. Όμως αυτό θα επιφέρει και αύξηση του χαμηλού κόστους που της αρχικής προσέγγισης, που θεωρείται ότι αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης.

- Να διερευνηθεί το κατά πόσο η χρήση ταχείας ανάμιξης επιτυγχάνει τη καλύτερη αποσυσσωμάτωση και διασπορά των κόκκων του τσιμέντου εντός των αδρανών σε σύγκριση με την συνήθη ανάμιξη. Επιπλέον θα μπορούσε να προστεθεί και η μια διαδικασία απαέρωσης, που εκτιμάται ότι θα αυξήσει τις μηχανικές αντοχές των δοκιμίων, λόγω απομάκρυνσης μέρους του εγκλωβισμένου αέρα.
- Τέλος για την επίλυση του προβλήματος της παρουσίας επιβλαβών προσμίξεων εντός της παιπάλης, να γίνει εφαρμογή της ξηρής αέριας απαγωγής της παιπάλης από τα αδρανή υλικά με αναρρόφηση, στα διάφορα στάδια επεξεργασίας τους.

Οι μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν την διερεύνηση:

- της προσθήκης εμπορικά διαθέσιμων υπερλεπτομερών πολυμερών, στις προτεινόμενες συνθέσεις της ίδιας τεχνολογίας, για την μείωση του πορώδους και την επίτευξη χαμηλότερων τιμών υδατοαπορόφησης
- της προσθήκης μικροϊνών από ανακυκλωμένο γυαλί για την αύξηση των αντοχών των προτεινόμενων προς εξώθηση συνθέσεων.

Οι παραπάνω κατευθύνσεις έρευνας θα μπορούσαν να αναδείξουν καλύτερα τις δυνατότητες που παρέχει η χρήση λεπτομερούς ασβεστολιθικού λατομικού παραπροϊόντος για την παραγωγή αυτοσυμπυκνούμενου μικροσκυροδέματος, όπου θα έχει ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές και ρεολογική ικανότητα και κυρίως ανταγωνιστικό κόστος παραγωγής.

Τέλος η αξιοποίηση του λατομικού παραπροϊόντος θα συμβάλλει σημαντικά στην καλύτερη εκμετάλλευση των πετρωμάτων, των λατομικών περιοχών, τα οποία αποτελούν εξαντλήσιμους φυσικούς πόρους και η ορθολογική διαχείριση τους είναι επιβεβλημένη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Felekoglu, B. (2005). Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete, *Cement and Concrete Composites*, Turkey, October 2005, pp.1-4.
- ELKEM MATERIALS (1997). Free-flowing castables-a prerequisite for wet-gunning of refractory castables, 7th International Metallurgical Conference in Ustron, Poland, May 1997, pp.2-7.
- Fraser, J. and McBride, R.A. (2000). The utility of aggregate processing fines in the rehabilitation of dolomite quarries. *Land Degradation and Development*, 11, pp.1- 17.
- Harrison, D. J. (2003). From waste to wealth: developing saleable mineral products from quarry waste. *In: Recycling and Reuse of Waste Materials*. Eds Dhir, R.K., Newlands, M.D., Halliday, J.E. pp.281-286.
- Hill, A. R., Dawson, A. R. and Mundy, M. (2001). Utilisation of aggregate materials in road construction and bulk fill. *Resources, Conservation and Recycling*, 32, pp.305-320.
- Brouwers, H. J. H. (2005). Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, *Cement and Concrete Research* 35, pp.2117-2123.
- Kwan and Fung (2009). Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar. Department of Civil Engineering, University Hong Kong, China, pp. 349-356.
- Touahamia, M., Sivakumar, V. and McKelvey, D. (2002). Shear strength of reinforced-recycled material. *Construction and Building Materials*, 16, pp 331- 339. 087/MIST2/DACM/01 MIST project reference: MA/2/4/003 Mineral Solutions Ltd., <http://www.mineralsolutions.co.uk/mist/mist2.pdf>

- Stark, U. and Mueller, A. (2003). Particle Size and Shape – Important Factors for Packing Density, Bauhaus-University Weimar, Germany, pp. 2-12.
- Ανδρεάδη, Ι. και Ταγκάλου Γ. (2008). Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα με έμφαση στις εφαρμογές για κατασκευές, 14^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2008, σελ. 1-11.
- Καλεντζώτης, Α. (2007). Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, 13^ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, Φεβρουάριος 2007, σελ. 1-9.
- Κτενάς, Α. (2006). Αυτοσυμπυκνούμενο Σκυρόδεμα, Πάτρα, 2006, Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα, 1-7 σελ, <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/ergasies%202006/7%20KTENAS.pdf>.
- Λεβεντάκης, Κ. (2009). Σχεδιασμός ποιότητας ειδικών δομικών στοιχείων βασισμένων σε υπερλεπτομερή λατομικά παραπροϊόντα, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, σελ. 105.
- Μαρίνος, Ι., Διαμαντώνης, Ν., Σακελλαρίου, Α., Παπαθανασίου, Α. (2008). Επίδραση κοκκομετρίας σε υψηλής ρευστότητας πάστας τσιμέντου-αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Αθήνα, Μάιος 2008, σελ. 1-7.
- Παπανικολάου, Κ. (2008). Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα στην ελληνική πραγματικότητα, νέες εξελίξεις, τάσεις και προοπτικές, http://library.tee.gr/digital/m2312/m2312_papanikolaou.pdf.
- Σιδέρης, Κ. (2008). Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα: Μύθοι και αλήθειες για ένα καινοτόμο τύπο σκυροδέματος, ΤΕΕ, Αθήνα, Μάιος 2006, σελ. 1-18.
- Τζεφέρης, Π. (2009), <http://elladitsamas.blogspot.com>

- Οικονόμου, Μ.Χ. (1993). Τεχνολογία του Σκυροδέματος, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, σελ. 25-46.
- Υπουργείο ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ (2006). Self compacting concrete, Πρόγραμμα δράσεων για τον εκσυγχρονισμό της παραγωγής δημόσιων έργων, Αθήνα, Ιανουάριος 2006, σελ. 1-24.

Παράρτημα Α

Κοκκομετρίες Υλικών

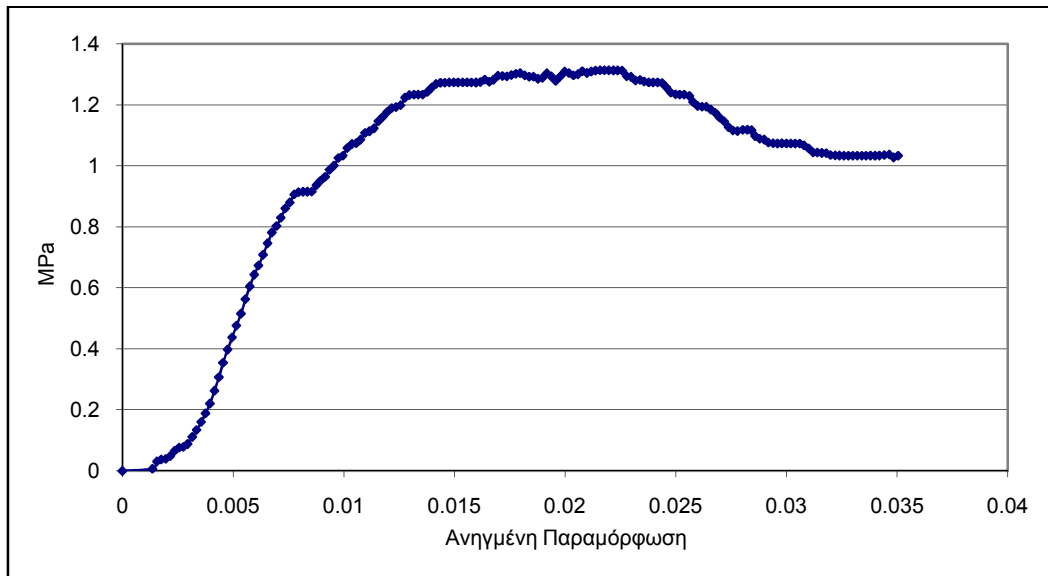
Πίνακας 3.1 Κοκκομετρίες πρώτων υλών

Διάμετρος Προβαλλομένης Εποφάνειας (μm)	Αθροιστικώς διερχόμενη λευκή παιπάλη	Αθροιστικώς διερχόμενη μαύρη παιπάλη	Αθροιστικώς διερχόμενη φαιά παιπάλη	Αθροιστικώς διερχόμενο τσιμέντο
0,0582	0,001185	0,005573	0,003815	0,01661
0,0679	0,00542	0,021195	0,01567	0,0599
0,0791	0,01667	0,054018	0,04328	0,14328
0,0921	0,04169	0,113453	0,098245	0,28071
0,1073	0,08984	0,209988	0,19524	0,48317
0,125	0,17197	0,35392	0,35043	0,75604
0,1456	0,29978	0,555443	0,581315	1,09901
0,1697	0,48677	0,82641	0,90915	1,50772
0,1977	0,74743	1,18006	1,358945	1,97296
0,2303	1,087495	1,623063	1,94679	2,47533
0,2683	1,485555	2,140493	2,652605	2,98111
0,3125	1,89958	2,700518	3,42338	3,45528
0,3641	2,31879	3,299563	4,24838	3,88919
0,4242	2,776325	3,978628	5,188035	4,30075
0,4941	3,286285	4,759533	6,269135	4,70569
0,5757	3,843955	5,641133	7,479355	5,12112
0,6707	4,483825	6,664013	8,877065	5,58106
0,7813	5,199295	7,820703	10,44578	6,10537
0,9103	5,972095	9,093153	12,1739	6,70597
1,0604	6,789335	10,4735	14,05542	7,37846
1,2354	7,632235	11,95526	16,08909	8,11746
1,4393	8,475005	13,53503	18,27516	8,91811
1,6767	9,298815	15,22871	20,63646	9,78363
1,9534	10,1081	17,08908	23,24238	10,73492
2,2757	10,92821	19,19799	26,18867	11,81163
2,6512	11,80572	21,65526	29,57759	13,07044
3,0887	12,81538	24,57494	33,51746	14,58391
3,5983	14,04876	28,05013	38,06873	16,42714
4,192	15,61178	32,13155	43,22104	18,66791
4,8837	17,61118	36,79419	48,85502	21,35231

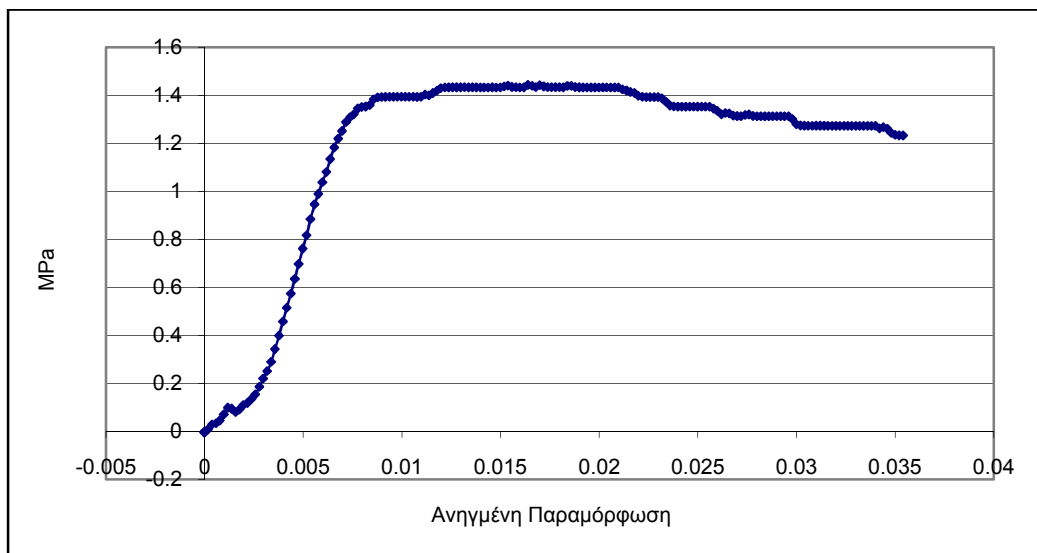
5,6895	20,13818	41,92597	54,74616	24,49551
6,6283	23,26079	47,35489	60,62301	28,08576
7,7219	27,04427	52,91156	66,25981	32,10399
8,996	31,52134	58,43132	71,48637	36,52211
10,4804	36,66073	63,767	76,20556	41,30109
12,2096	42,37599	68,8167	80,24133	46,39868
14,2242	48,51642	73,52292	83,66502	51,76398
16,5712	54,87121	77,81917	86,5772	57,32945
19,3055	61,21642	81,68337	89,08317	63,0188
22,4909	67,35706	85,12397	91,26844	68,75802
26,2019	73,11901	88,15795	93,19102	74,49705
30,5252	78,22424	90,80445	94,87862	79,93596
35,5618	82,551	93,07691	96,32792	84,9043
41,4295	86,11288	94,98311	97,53893	89,25201
48,2654	88,97034	96,52463	98,51163	92,86701
56,2292	91,21171	97,70053	99,24605	95,74931
65,507	92,93871	98,51677	99,74216	97,8989
76,3157	94,26287	98,99647	99,99998	99,31578
88,9077	95,29609	99,25069	99,99998	99,99996
103,5775	96,1429	99,43856	99,99998	99,99996
120,6678	96,88761	99,59382	99,99998	99,99996
140,578	97,58285	99,73192	99,99998	99,99996
163,7733	98,24692	99,85076	99,99998	99,99996
190,7959	98,86539	99,93879	99,99998	99,99996
222,2773	99,39525	99,98964	99,99998	99,99996
258,953	99,77935	100	99,99998	99,99996
301,6802	99,99338	100	99,99998	99,99996
351,4575	100	100	99,99998	99,99996
409,4479	100	100	99,99998	99,99996
477,0068	100	100	99,99998	99,99996
555,713	100	100	99,99998	99,99996
647,4056	100	100	99,99998	99,99996
754,2275	100	100	99,99998	99,99996
878,675	100	100	99,99998	99,99996

Παράρτημα Β

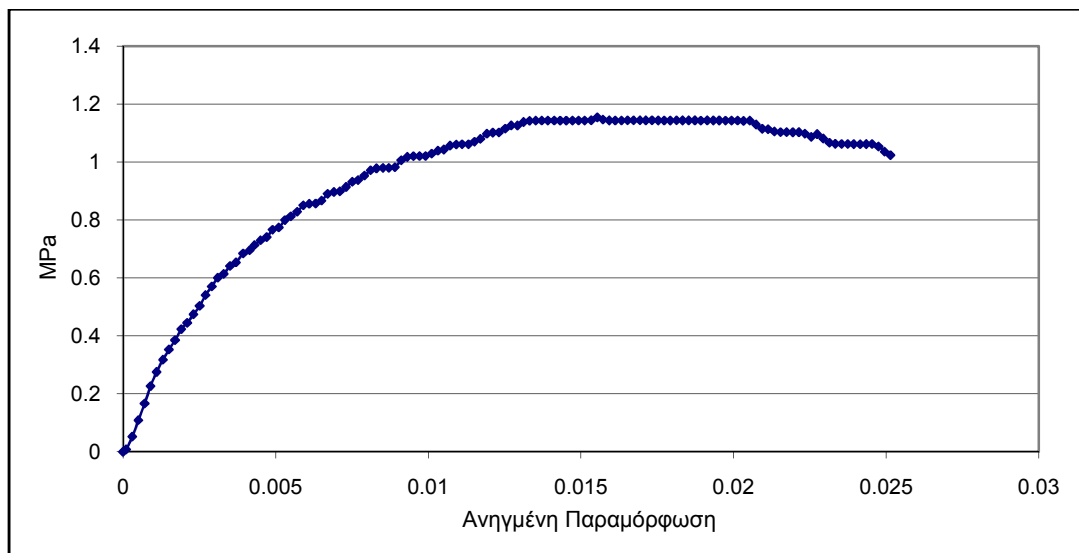
Διαγράμματα Τάσης-Ανηγμένης Παραμόρφωσης



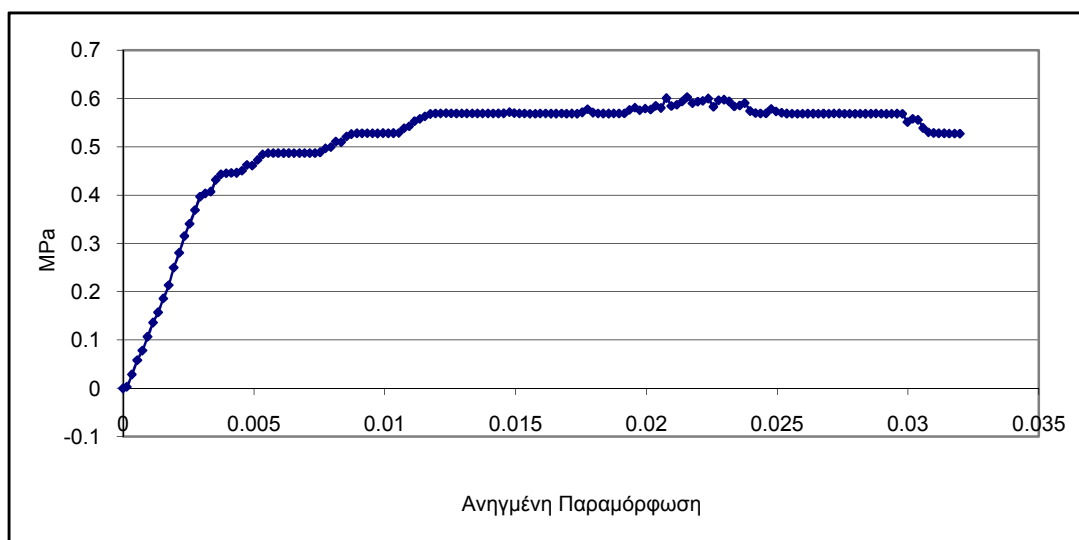
Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένη Παραμόρφωση 1^{ου} δοκιμίου Α σύνθεσης



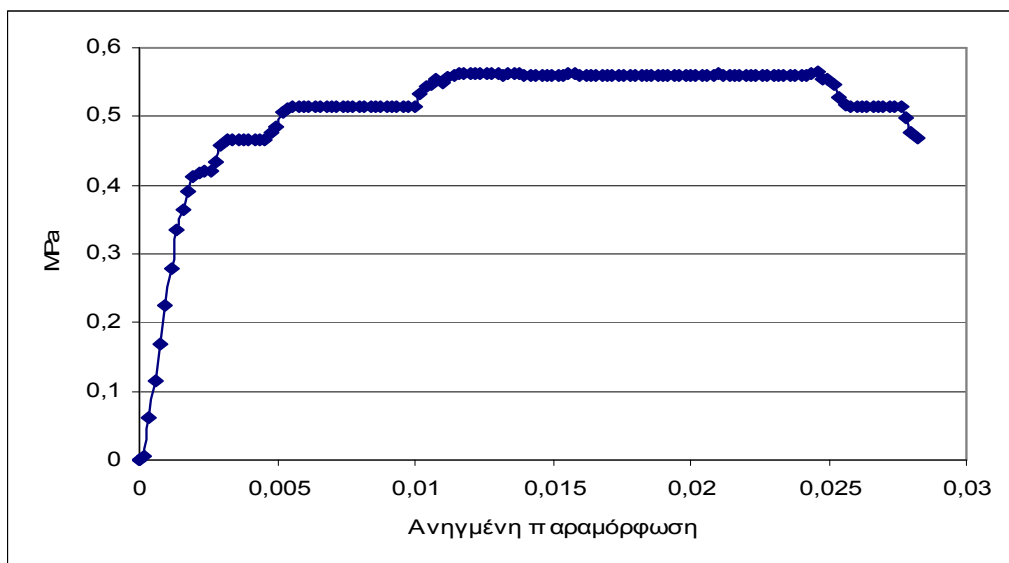
Διάγραμμα Τάσης-Ανηγμένη Παραμόρφωση 2^{ου} δοκιμίου Α σύνθεσης



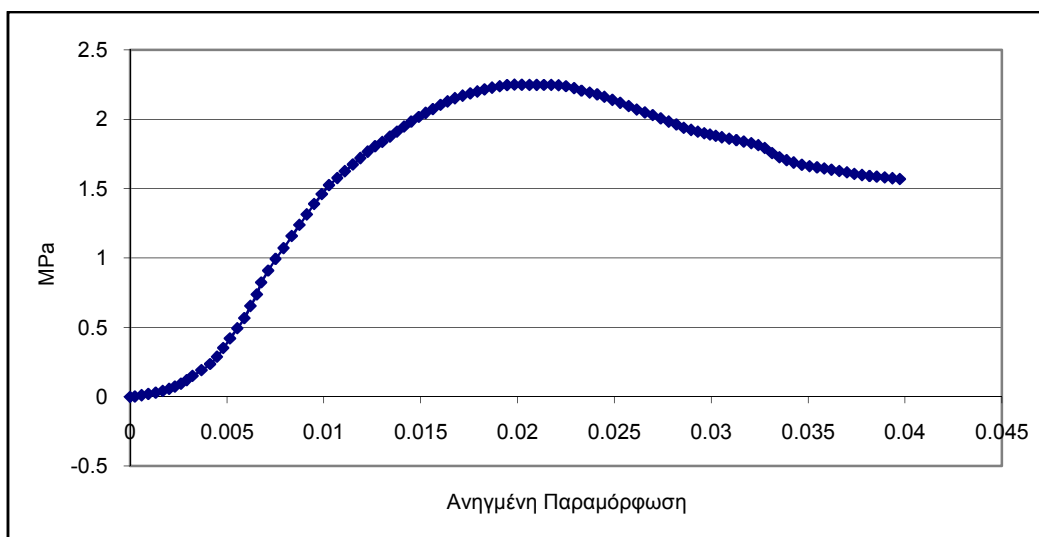
Διάγραμμα Τάσης- Ανηγμένη Παραμόρφωση 3^{ου} δοκιμίου Β σύνθεσης



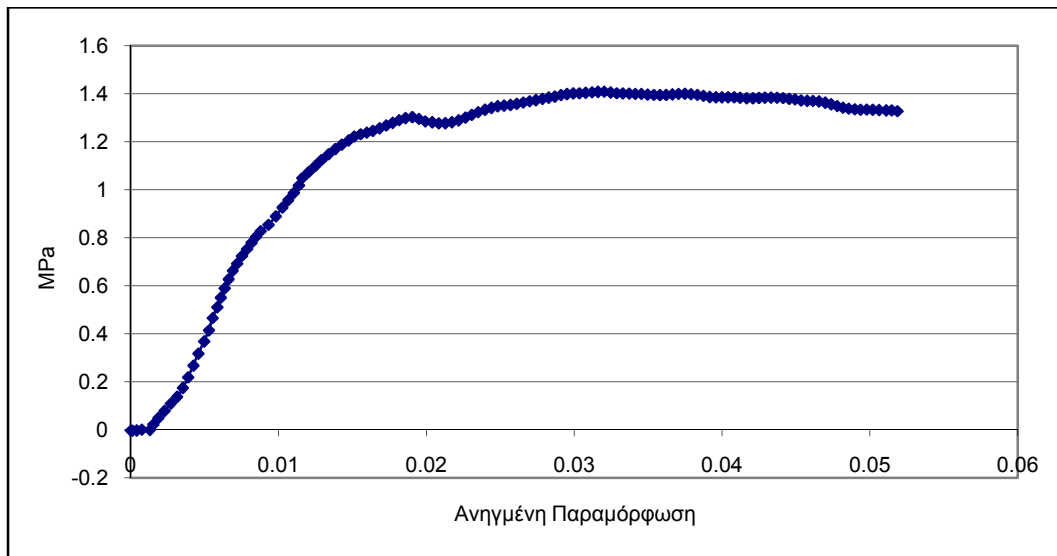
Διάγραμμα Τάσης- Ανηγμένη Παραμόρφωση 4^{ου} δοκιμίου Γ σύνθεσης



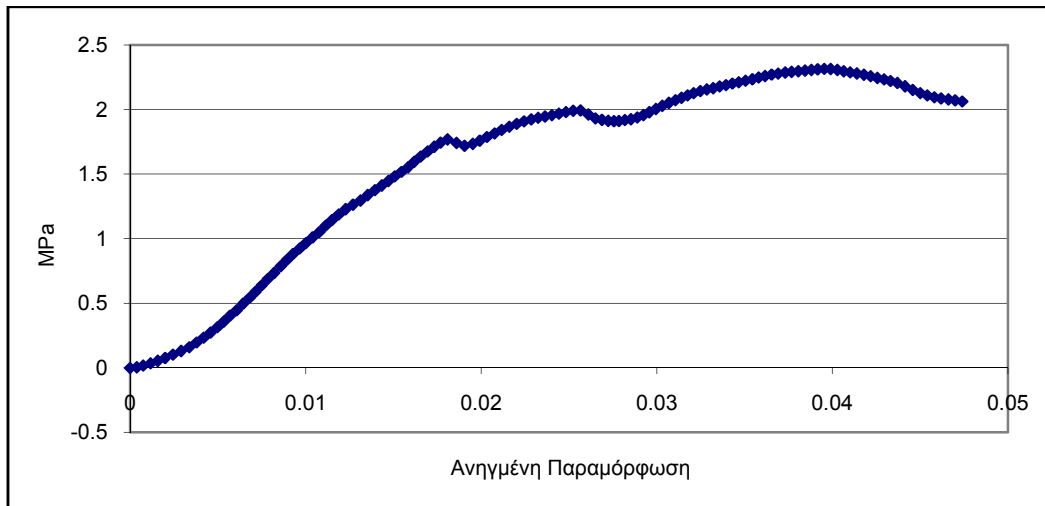
Διάγραμμα Τάσης- Ανηγμένη Παραμόρφωση 1^{ου} δοκιμίου Δ σύνθεσης



Διάγραμμα Τάσης- Ανηγμένη Παραμόρφωση 4^{ου} δοκιμίου A₂ σύνθεσης



Διάγραμμα Τάσης- Ανηγμένη Παραμόρφωση 4^{ου} δοκιμίου Γ₂ σύνθεσης



Διάγραμμα Τάσης- Ανηγμένη Παραμόρφωση 2^{ου} δοκιμίου Δ₂ σύνθεσης